LA FRONTERA DEL INFINITO

De los agujeros negros a los confines del Universo

PAUL DAVIES

Existen lugares del Universo en los que la gravedad es tan fuerte que arrolla todas las leyes y fundamentos físicos, destruye el espacio y el tiempo y los transforma en singularidades.

¿Qué ocurre cuando la gravedad se apodera del control de la materia y corre hacia el infinito? ¿Qué es una singularidad desnuda? ¿Qué relación hay entre un agujero negro y una singularidad?

La frontera del infinito responde puntual y científicamente a estas preguntas sin recurrir a explicaciones complicadas. Este libro interesará también a las personas a quienes la ciencia real resulta más extraña que la ciencia ficción.

Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres y catedrático de física teórica en la Universidad de Newcastle. Autor de artículos para publicaciones científicas y de libros como: El Universo desbocado; Superfuerza; El Universo accidental; Dios y la nueva física; En busca de las ondas de gravitación; Otros mundos, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.



12

LA FRONTERA DEL INFINITO - Paul Davies

SALVAT

PAUL DAVIES

LA FRONTERA DEL INFINITO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

LA FRONTERA DEL INFINITO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT



PAUL DAVIES

LA FRONTERA DEL INFINITO

De los agujeros negros a los confines del Universo

SALVAT

Versión española de la obra original inglesa, *The Edge of Infinity* de Paul Davies y publicada por J. M Dent & Sons Ltd. de Londres

Traducción: Manuel Sanromá

ISBN: 0-460-04490-7 Versión original
ISBN: 84-345-8246-5 Obra completa
ISBN: 84-345-8367-4
Depósito legal: NA-1301-85
Publicado por Salvat Editores, S. A., Mallorca, 41-49 - Barcelona
Impreso por Gráficas Estella. Estella (Navarra)
Printed in Spain

Prefacio

Hace algunos años, cuando empezaron a multiplicarse en las librerías los libros sobre agujeros negros, estaba cenando en una ocasión con un grupo de científicos que habían llevado a cabo algunos descubrimientos en este tema. Parecían algo sorprendidos por el hecho de que su trabajo cotidiano fuera de pronto foco de la atención pública. "¿Qué es lo que sucederá a todo esto?" preguntó uno. "¡La singularidad desnuda!" fue la respuesta inmediata. Es así como he escrito, con cierta complacencia, un libro sobre singularidades desnudas. La singularidad debería entenderse no como un objeto o una cosa, sino como un lugar donde todas las leyes conocidas deben tener validez.

Cualquier incursión en el mundo de la física moderna está abocada a producir sorpresas. El tema de la gravedad, con sus extraordinarias nociones de espacio y tiempo deformados, horizontes de sucesos y catastróficos colapsos de estrellas, fascina tanto al científico como al hombre de la calle. Gran parte del material, aun a pesar de estar basado en trabajos de investigación ya publicados, resultará, no obstante, polémico. Sin embargo, una cosa está clara: existen regiones del Universo donde la gravedad es tan aplastante que pone en cuestión todas las leyes y estructuras físicas, regiones donde se llega al borde mismo del infinito.

Para que el lector disfrute de este libro no es necesario que posea ningún conocimiento básico de matemáticas o de física en concreto. Si bien muchas de las ideas que se describen requieren de una buena dosis de espíritu imaginativo, he intentado basar la mayor parte de mi exposición en diagramas y figuras.

Quisiera agradecer a los doctores N. D. Birrell y D. C. Robinson las fructíferas discusiones que hemos mantenido.



PREFACIO A LA EDICIÓN DE 1994

Qué colegial no se ha quedado perplejo ante la pregunta: ¿Existirá siempre el universo? Recuerdo muy bien que mi padre respondía que el universo tiene que ser infinito en cuanto a la extensión espacial porque, si hubiera un límite en algún lugar, debería haber *algo* más allá de dicho límite. Este tipo de respuesta se utiliza desde la antigüedad. El filósofo y poeta romano Lucrecio nos invita a imaginar que viajamos a la hipotética frontera del universo y que arrojamos una lanza. ¿Qué impediría que llegara a la región situada más allá? Si lo impidiera la sustancia, esa sustancia tendría que ocupar el espacio. Si no hubiera ninguna sustancia, habría un espacio vacío. De una forma u otra, el universo no podría terminar allí.

Durante las últimas décadas, los científicos han descubierto que el argumento de Lucrecio es imperfecto. Pueden existir límites o fronteras para el espacio y el tiempo. Se conocen como *singularidades*. Y no es sólo el espacio-tiempo el que termina en una singularidad. Todas las cosas físicas, la materia, la energía e incluso las lanzas, dejan de existir en ellas. Una singularidad representa, en el sentido más profundo posible, el final del universo.

Ahora el lector puede suponer que una singularidad en el espacio-tiempo es extraña e improbable, el tipo de posibilidad que plantea un científico teórico extremadamente eufórico cuando da rienda suelta a su imaginación. No es así. En la década de los años sesenta, profundas investigaciones matemáticas demostraron una serie de teoremas bastante precisos, descubiertos principalmente por Roger Penrose y Step-

hen Hawking en Gran Bretaña, y Robert Geroch en los Estados Unidos, que probaron que las singularidades del espacio-tiempo son casi inevitables.

La singularidad mejor conocida es la que, según los científicos, caracterizó el origen del universo en una gran explosión o big bang. Ésta fue, al parecer, el comienzo del espacio y el tiempo y, por lo tanto, representa un último límite del universo físico en nuestro pasado. La posibilidad de que el universo se originara en una singularidad del espacio-tiempo ha estado implícita en la teoría cosmológica desde los primeros años veinte y en la obra matemática de un desconocido meteorólogo ruso llamado Alexander Friedmann.

Sin embargo, no fue hasta los años sesenta cuando el tema de las singularidades se estudió de una manera más general. En aquella época los físicos se emocionaron mucho con la idea del colapso gravitatorio. Ya en 1930, un joven estudiante indio, Subramanian Chandrasekhar, dedujo a partir de sus cálculos que si una estrella de un tamaño medio se consume, sufre un colapso gravitatorio total, sin ningún límite aparente. En otras palabras, el razonamiento matemático sugirió que la estrella colapsaría hasta desaparecer. A finales de la década de los treinta, Robert Oppenheimer, el físico que dirigiría el Proyecto Manhattan destinado a construir una bomba atómica en tiempo de guerra, estudió con más detalle el problema del colapso gravitatorio de una estrella y llegó a una conclusión similar.

Pero en aquel tiempo el mundo teórico parecía muy alejado del mundo de los sistemas astronómicos reales. Todo ello cambió en los años sesenta cuando los astrónomos descubrieron unos nuevos objetos extraños llamados quasars (objetos casi estelares). Los quasars, que se encuentran entre los objetos conocidos más distantes del universo, resultaron tener una energía inmensa y ser cuerpos de gran masa, con todo, de un tamaño muy pequeño. Quedaba claro que el campo gravitatorio en la superficie de un cuerpo de gran masa y compacto como éste debe ser inmenso, y el cuerpo corría el riesgo de implosionar bajo su propio peso. Los físicos y matemáticos teóricos empezaron a calcular con impaciencia qué sucedería cuando un objeto de este tipo ya no pudiera resistir la fuerza de la gravedad. Para descubrirlo utilizaron la teoría general de la relatividad de Einstein, publicada originalmente en 1915, pero que todavía era poco estudiada.

La relatividad general, como se denomina normalmente, es una teoría que trata de la gravedad, el espacio y el tiempo. Einstein propuso que, hablando estrictamente, la gravitación no es una fuerza, como Newton había supuesto, sino una distorsión o deformación del espacio-tiempo. Expresado de otro modo, la gravedad representa una curvatura o deformación de la geometría del espacio-tiempo. A grandes rasgos, cuánto mayor es la intensidad de un campo gravitatorio tanto mayor es la distorsión del espacio y el tiempo. Cuando se produce un colapso gravitacional parece que este efecto deformador puede continuar sin límite hasta que el espacio-tiempo llega a ser infinitamente distorsionado y no puede continuar: desarrolla lo que se conoce como singularidad.

La posibilidad de que nuestro universo se originara en una singularidad fue aceptada por muchos científicos sin excesiva preocupación, porque la singularidad del big bang está «acabada y terminada». El colapso gravitatorio de una estrella, por otra parte, era una cuestión muy diferente. En este caso existía la posibilidad de que se formara una singularidad en alguna región localizada del universo en la que nunca hubiera existido una singularidad. ¿Qué sucedería en estas circunstancias? Entre los científicos existía un temor atávico que recordaba la ansiedad de los exploradores medievales cuando contemplaban la caída de la frontera de la Tierra. ¿Un «explorador» que topara con una singularidad «caería» por la frontera del universo? ¿Cuál sería la influencia de la curvatura infinita del espacio-tiempo sobre la materia? ¿Y que le ocurriría a la sustancia de la estrella que hubiera sufrido un colapso en primer lugar? ¿Dejaría simplemente de existir?

Al lado de esta preocupación por lo que pudiera ocurrir a cualquier cosa que entrara en una singularidad existía la inquietud acerca de lo que pudiera salir. La razón de esta preocupación va más allá de la simple inquietud por la coherencia de la relatividad general. Toda la actividad científica se funda en la creencia de que el universo físico es racional y previsible. El principio de causa y efecto sugiere que en el universo los acontecimientos no suceden atropelladamente, sino que siempre tienen sus causas en algo más, algún acontecimiento o acontecimientos físicos anteriores. Importante para esta creencia es la suposición de que el espacio y el tiempo son continuos, de modo que los acontecimientos que ocurren en un lugar y tiempo pueden influir en los que ocurren en otros lugares y tiempos. Este tipo de «acción a distancia» ha sido una característica esencial de la física desde los albores de la ciencia. La perspectiva de una singularidad en el espacio-tiempo amenaza este principio básico de causalidad racional. Si el espacio-tiempo tiene un límite en algún lugar en que se rompe la causalidad racional, entonces no podemos saber lo que saldría de ello. Los acontecimientos en regiones completamente normales del espacio-tiempo (por ejemplo en la Tierra en este momento) pueden ser alterados por

influencias físicas completamente arbitrarias e irracionales que emanen de dicha singularidad. La ciencia ya no nos permitiría predecir con algún grado de certidumbre lo que pasará después. Surgiría la anarquía cósmica.

La perspectiva de que una comunidad tecnológica avanzada pudiera, al menos en principio, crear tal monstruosidad «en el laboratorio» se vio con alarma. La idea de que seres sensibles —quizás incluso los humanos— podrían destruir voluntariamente la racionalidad del cosmos mediante la manipulación deliberada de la materia es en extremo inquietante. El hecho de que las leyes del universo —el epítome mismo del orden y la racionalidad cósmicos— permitan realmente la destrucción en su interior de este mismo orden y racionalidad es muy preocupante. En efecto, si usamos la palabra «natural» para describir acontecimientos causados de un modo racional y de acuerdo con una ley, la singularidad del espacio-tiempo debe considerarse una interfase entre el mundo natural y un dominio sobrenatural del más allá. En el contexto del origen del universo, algunos podrían considerar aceptable la idea de un componente sobrenatural. Pero el desencadenamiento repentino en «medio del universo» de influencias sobrenaturales por, digamos, el colapso de una estrella (quizá logrado deliberadamente por los mortales) parece profundamente acientífico.

La respuesta a este incómodo descubrimiento ha variado. Algunos científicos han sugerido que el orden se puede restaurar con el simple recurso de imponer leyes adicionales a las singularidades, llevándolas, por lo tanto, al dominio «natural». Hasta ahora, todas las leyes físicas conocidas se han formulado dentro del contexto del espacio y el tiempo continuos, pero no hay ninguna razón lógica que explique por qué tiene que ser así. Sin embargo, inventar simplemente un nuevo tipo de ley para las singularidades, porque las viejas ya no son válidas, parece algo arbitrario.

Una segunda sugerencia es que hay algo equivocado en los teoremas que predicen la existencia de singularidades. Quizá la relatividad general falla bajo las condiciones extremas del colapso gravitacional. O tal vez el concepto mismo de un espacio y tiempo continuos es erróneo en sí mismo. No obstante, los físicos están muy apegados a la relatividad general. Es una de las teorías más bellas y poderosas de la ciencia. Eso, por supuesto, no la hace necesariamente correcta, aunque dicha teoría se abandonará con gran desgana. Además, el concepto de una singularidad del espacio-tiempo no está nada mal. La singularidad del big bang sirve para un

propósito muy útil al proporcionar un origen cósmico definido. Sin él, a primera vista parece que el universo tiene que ser infinitamente viejo, y resulta que un universo eterno de este tipo plantea graves problemas físicos y filosóficos (para una descripción de esos problemas véase mi libro *The Mind of God*).

Las investigaciones de mayor alcance sobre las posibles modificaciones de la relatividad general han surgido de la aplicación de la física cuántica a la gravitación, un tema conocido como gravedad cuántica. La aplicación de mayor éxito de la teoría cuántica se da en el reino de los átomos y las partículas subatómicas. Hace muy pocos años que se ha aplicado seriamente a los sistemas gravitacionales, que tienden a ser asociados con objetos a gran escala como las estrellas. Las reglas de la física cuántica son extrañas y bastante diferentes de las leyes que son válidas en situaciones «cotidianas». En este caso hay grandes posibilidades para una visión espectacularmente alternativa de las singularidades del espacio-tiempo. Por desgracia, en el momento en que escribo esto todavía no se ha formulado ninguna teoría de la gravedad cuántica completamente satisfactoria. Aunque se han realizado muchos cálculos sugerentes, aún no se han extraído conclusiones rigurosas matemáticamente coherentes. La gravedad cuántica nos *puede* salvar de las singularidades, pero el jurado todavía delibera sobre el tema.

Desde la primera edición de este libro se ha producido una evolución muy significativa, aunque provisional, en el campo de la gravedad cuántica. James Hartle y Stephen Hawking han realizado algunos cálculos que sugieren un modo de eliminar la singularidad del big bang *sin* que sea necesario que el universo sea infinitamente viejo. Hawking ha descrito estas ideas en su *Historia del tiempo*. Para entender lo esencial de ellas consideren las dos afirmaciones siguientes. (i) El universo ha existido siempre. (ii) Hubo un primer instante del tiempo. A primera vista, *o bien* debe ser correcta la afirmación (i) *o* la afirmación (ii). Sin embargo, lógicamente será así sólo si el «tiempo» es un asunto de todo-o-nada; es decir, si existe o no. La postura tradicional es la siguiente: el tiempo «arrancó» de repente al principio, en la singularidad del big bang. Ahora bien, uno de los aspectos esenciales de la teoría de la relatividad es que el tiempo no se puede considerar aislado; está íntimamente relacionado con el *espacio* de una manera que se describirá con claridad a lo largo de los siguientes capítulos. En realidad, el tiempo es en muchos aspectos tan parecido al espacio que se le ha llamado la cuarta dimensión. Aquí es donde la física cuántica tiene un papel

importante que desempeñar, *desdibujando la distinción* entre el tiempo y el espacio hasta el punto que la unión de los dos —el espacio-tiempo— pueda ser auténticamente cuadridimensional en determinadas circunstancias. Específicamente, según Hartle y Hawking, estas circunstancias predominaron en las condiciones extremas del big bang. Por lo tanto, al principio el tiempo fue (aseguran) «espacializado» (o «imaginario», para usar la terminología de Hawking). En otras palabras, el tiempo *emergió* del espacio, como una dimensión de un continuo cuadridimensional. Esa emergencia no fue una «conexión» brusca del tiempo sino un proceso *continuo*. A grandes rasgos, una de las cuatro dimensiones espaciales se convirtió «gradualmente» en tiempo. Esta temporalización, al ser continua, significaba que nunca hubo un «primer» momento. Por otra parte, el tiempo no se extiende hacia el pasado durante toda la eternidad. Está vinculado con el pasado pero no por una singularidad discontinua. La razón del miedo que envuelve a la palabra «gradualmente» es doble. Primero, porque la palabra gradual implica que se mide un proceso físico en relación con el tiempo, y en este caso el proceso se refiere al nacimiento del tiempo mismo. Segundo, porque la escala real de estos acontecimientos es insignificante para las escalas humanas: medidos en términos de espacio son veinte potencias de diez más pequeñas que un núcleo atómico; medidos en términos de tiempo «ocurrieron» en menos de una billonésima de billonésima de billonésima de millonésima de segundo! Sin embargo, eran continuos.

El trabajo de Hartle y Hawking se desarrolló en el contexto del big bang, pero también puede ser válido para todas las singularidades, incluyendo las que surgen del colapso gravitatorio. En estos momentos no es posible extraer conclusiones concretas. No obstante, puede ser que la física cuántica rescate al universo de la amenaza de las singularidades del espacio-tiempo. Si es así, muchas de las consecuencias metafísicas, e incluso teológicas, de la cosmología moderna tendrán que modificarse. Entro en detalle en estos temas más filosóficos en el capítulo VIII, pero las ideas de este capítulo se han visto superadas por los acontecimientos y remito al lector a *The Mind of God* para una valoración más actualizada.

Una tercera respuesta al problema de las singularidades ha sido aceptar su existencia, pero encontrar un modo de limitar los daños. En los años sesenta Roger Penrose propuso lo que llamó la hipótesis del censor cósmico, según la cual si una singularidad se forma de un colapso gravitacional, siempre se formará un agujero negro a su alrededor, de manera que desde el universo exterior no se podrá ver. La singularidad no sólo permanecería discretamente cubierta, sino que el agujero negro impediría que cualquier influencia física peligrosa emanara de la singularidad e invadiera el universo restante. El término *singularidad desnuda* se usó para designar una singularidad que no estaba escondida, sino que todos podían ver, y quizás impresionar a sus observadores. Por lo tanto, la hipótesis del censor cósmico implica que en el universo no debería haber singularidades desnudas.

El tema de los agujeros negros, incluyendo su formación y propiedades, recibió mucha atención en los años setenta y ochenta. Se dedicó un gran esfuerzo a investigar cómo el colapso de una estrella de gran masa podía producir un agujero negro, con una singularidad ubicada en algún lugar de su interior. Estas investigaciones matemáticas se hicieron a la par que profundas investigaciones de los astrónomos que aspiraban a descubrir agujeros negros en el universo real. Desde la primera edición de este libro, las pruebas de la existencia de los agujeros negros se han reforzado considerablemente. Hay una serie de candidatos a agujeros negros que parecen ser los restos de estrellas colapsadas, tal como previó Chandrasekhar hace más de sesenta años. Estos objetos revelan su presencia cuando están cerca de una estrella normal. En tales sistemas binarios puede suceder que la poderosa gravedad del agujero negro atraiga material de la estrella compañera, y a medida que los gases arrebatados se arremolinan alrededor del agujero se calientan y brillan emitiendo rayos X, algo muy característico.

También hay cada vez más pruebas de la existencia de agujeros negros masivos y supermasivos con el equivalente de un millón a mil millones de masas solares. Una localización favorita para estos agujeros monstruosos es el centro de una galaxia; puede haber uno de tamaño más moderado en el corazón de nuestra propia Vía Láctea. Otras galaxias sugieren que ocurren algunos procesos extremadamente energéticos en sus centros, y a menudo implican la expulsión de enormes chorros de gas de gran velocidad. Los astrónomos creen que estas perturbaciones se deben probablemente a la existencia de agujeros negros supermasivos en rotación que atraen gas de los centros galácticos y que liberan grandes explosiones de energía como resultado de este proceso. Esta energía se canaliza, entonces, a lo largo de los chorros. Cada vez más, los astrónomos llegan a la conclusión de que los agujeros negros desempeñan un papel importante en la formación del universo para una serie de escalas.

Parece probable que los intensos campos gravitatorios de los agujeros negros provoquen muchos fenómenos violentos e irregulares. desde estrellas irregulares a galaxias en explosión.

La aceptación de la realidad de los agujeros negros significa que el colapso gravitatorio se debe tomar con seriedad. y se plantea la cuestión de si un colapso produce siempre un agujero negro o si una singularidad desnuda —con todas sus tremendas implicaciones— es una posibilidad real. Los esfuerzos continuados para demostrar la hipótesis del censor cósmico han fracasado. Por otro lado. los cálculos relativos al destino de las masas en colapso de materia han sugerido que pueden producirse singularidades desnudas. Recientemente. se han descubierto algunos importantes resultados nuevos.

En términos generales. resulta que el colapso gravitatorio de una esfera de materia más o menos uniforme producirá casi con toda seguridad un agujero negro. En contraste. si la materia en colapso tiene una forma extraña. gira rápidamente o es muy poco homogénea. amenaza una singularidad desnuda. El principal problema al estudiar el colapso de distribuciones desproporcionadas de materia es que las ecuaciones de la relatividad general se hacen muy complicadas. Sin embargo. usando un superordenador para la realización de los cálculos. Stuart Shapiro y Saul Teukolsky. del Centro de Radiofísica e Investigación Espacial de la Universidad de Cornell. han podido presentar algunos resultados detallados en un estudio titulado «Formación de las singularidades desnudas: la violación de la hipótesis del censor cósmico». publicado en *Physical Review Letters* en febrero de 1991.

Shapiro y Teukolsky emprendieron la demostración de una idea de Kip Thorne. del Instituto de Tecnología de California. Como otros. Thorne espera que el colapso de un cuerpo casi esférico dará lugar siempre a un agujero negro. pero que si el cuerpo se desvía mucho de una forma simétrica puede obtenerse una singularidad desnuda. Para cuantificar esta suposición. Thorne nos invita a imaginar un aro circular de pequeño tamaño. Si el cuerpo en colapso puede atravesar el aro en todas direcciones. se producirá un agujero negro. Si no puede, es perfectamente posible obtener una singularidad desnuda. Por consiguiente. un cuerpo que permanece muy desproporcionado cuando entra en colapso —por ejemplo. con forma de torta o puro— puede bloquear el aro en ciertas direcciones. si está lo suficientemente distorsionado. y terminar produciendo una singularidad desnuda.

Si la conjetura del aro es correcta. la probabilidad de una singularidad desnuda dependerá de si cualquier asimetría inicial en la forma del cuerpo en colapso se corrige durante el colapso —es decir. si los pedazos que salen hacia el exterior son atraídos hacia el interior— o de si la gravedad tiene el efecto de ampliar la falta de proporcionalidad. Para probar la cuestión. Shapiro y Teukolsky estudiaron el colapso de las nubes de polvo sometidas a la gravitación dispuestas inicialmente en esferoides estáticos de forma oblonga y achatada. las formas que resultan cuando una esfera se estrecha por el ecuador. o se configura como una pelota de rubgy. respectivamente. El trabajo preliminar sugirió que al colapsar un cuerpo se hace más y más asimétrico. de modo que lo que empieza como un esferoide ligeramente oblongo termina adoptando una forma delgada de huso. mientras que un esferoide achatado adopta una forma de torta cada vez más aplanada. Los husos son los que muestran las propiedades más inquietantes. Como expongo en el capítulo VI. hace tiempo que se sabe que los cálculos del colapso de cilindros infinitamente largos en husos predicen singularidades desnudas. La cuestión esencial por resolver era si en un modelo más realista. que incluyera un objeto alargado de longitud finita. se obtendrían resultados similares.

Los cálculos completos realizados con el superordenador permitieron confirmar estas primeras ideas. En primer lugar. Shapiro y Teukolsy descubrieron que el colapso de los esferoides oblongos tendían a producir agujeros negros: la hipótesis del censor cósmico no se violaba. Para los esferoides achatados. sin embargo. la situación era notablemente distinta. Cuando el esferoide era dos veces más largo que ancho. y el tamaño inicial era varias veces el tamaño de un agujero negro para la masa equivalente de material. los cálculos predecían que el colapso terminaría dando lugar a una singularidad desnuda. La singularidad tiene la forma de una línea de la curvatura infinita del espacio-tiempo que coincide con el eje del huso pero, curiosamente. se extiende hacia la región del espacio vacío. Además. el huso terminaba siendo mucho más largo que el aro imaginario de Thorne. lo que demostraba la conjetura del aro. Por otra parte. para una disposición menos desproporcionada. los cálculos predecían que se formará un agujero negro y que la materia pasará fácilmente a través del aro en todas direcciones. La conclusión parece ser que una distribución suficientemente asimétrica de la materia colapsará. en efecto. para dar lugar a una singularidad desnuda.

El tema de los agujeros negros y las singularidades desnudas continúa siendo un campo apasionante que se desarrolla con gran rapidez. Las ideas descritas en los próximos capítulos constituyen uno de los enigmas más profundos y desafiadores a que se enfrenta la ciencia del siglo XX. No sólo está en cuestión la existencia de límites para el universo físico sino, quizá, la de límites para la noción misma de lo que se puede conocer y comprender.

PAUL DAVIES
ADELAIDE, 1993

NOTA SOBRE TERMINOLOGÍA

Siempre que ha sido posible, se han utilizado unidades métricas. Para las distancias astronómicas el año luz es habitualmente la más adecuada. Esta distancia es la que recorre la luz en un año (no es una medida de tiempo) y equivale a 9,5 billones de kilómetros, o bien seis billones de millas. La luz viaja a 300.000 kilómetros por segundo. En ocasiones se mencionan las frecuencias de radio que se miden en "megahertz", abreviado MHz, siendo un megahertz equivalente a un millón de ciclos por segundo.

El concepto de masa aparece frecuentemente en este libro. En la Tierra los conceptos de masa y peso se usan a menudo indistintamente, pero esto puede inducir a confusión. Es mejor pensar en la masa como cantidad de materia. En algunos casos se utiliza también como medida de poder gravitatorio. Cuando se utiliza el término "cuerpos masivos", ello no implica que sean cuerpos grandes, sino que tienen una gran masa. Así una estrella de neutrones tiene solamente unos pocos kilómetros de diámetro, pero es muchísimo más masiva que la Tierra, que contiene mucho menos material y ejerce una atracción gravitatoria más debil.

Índice de capítulos

1. La conexión cósmica

Cuando a finales de los años sesenta y principios de los setenta el desencanto de la gente con respecto a la ciencia empezó a crecer, hubo una rama de la misma que no se vio afectada. La astronomía, la rama más antigua de las ciencias, sigue siendo hoy un símbolo tan poderoso como siempre de la enorme capacidad humana para comprender el mundo. A medida que se investiga el cielo con aparatos cada vez más sofisticados, van apareciendo en la prensa cotidiana nuevos y sorprendentes descubrimientos en una secuencia que parece no tener fin. Quasars, pulsars, estrellas de neutrones, agujeros negros... objetos de nombres raros y de propiedades enigmáticas y a menudo extrañas, siguen estimulando la imaginación tanto del científico como del hombre de la calle.

La fascinación que impulsa a conocer qué está pasando en el Universo no es desde luego una moda reciente. Refleja una conciencia cultural profundamente enraizada de nuestra relación con el Cosmos que tiene sus orígenes en el pasado remoto. Todo lo relacionado con el cielo ha ido ligado siempre a lo sobrenatural, e incluso en nuestra era tecnológica se mira a los objetos astronómicos con un cierto temor casi reverencial. Una ojeada a los estantes de muchas librerías nos revela enseguida la afinidad que siente el público comprador, por ejemplo, entre los agujeros negros y el mundo de lo oculto, por poner citar un caso concreto.

En todas las culturas antiguas se puede apreciar el significado místico de la astronomía. Muchos monumentos, templos, amuletos y adornos mágicos, reliquias religiosas y documentos atestiguan la poderosa influencia que los acontecimientos transcurridos en el firmamento han ejercido sobre los asuntos humanos. En muchas culturas primitivas, el cielo era el dominio de los dioses y la organiza-

ción del Cosmos reflejaba el funcionamiento metafísico de lo sobrenatural. Los astrólogos, que podían interpretar el orden cósmico y relacionarlo con el destino de los mortales, eran tenidos en gran estima y gozaban de un gran poder social y político.

Parece poco probable que la preocupación por nuestras relaciones con el Cosmos apareciera como un mero resultado de la institucionalización de la teología, ya que surgió entre las primeras grandes comunidades en los albores de la historia documentada. El interés común por la astronomía en culturas tan dispares como la de los sumerios y la de los indios americanos apunta hacia una conciencia mucho más básica de nuestra dimensión cósmica. La razón de esto sigue siendo un misterio, pero seguramente no es más que un resultado de nuestra evolución. Quizá no seamos los únicos animales que hayan percibido la existencia de las estrellas, pero el continuo y extendido culto a los objetos celestes indica que la astronomía significa para nosotros algo más que el simple uso práctico de la misma para la navegación.

La aparición de la ciencia y la tecnología tal como hoy las conocemos estuvo íntimamente ligada a los avances que se realizaron en astronomía durante el Renacimiento europeo en el siglo XVII. Hasta entonces las opiniones en materia astronómica habían quedado casi exclusivamente reservadas al clero, como correspondía a un tema con implicaciones teológicas tan directas. Cuando Galileo, Kepler, Copérnico y posteriormente Newton empezaron a analizar los movimientos de los planetas utilizando la matemática y el concepto de ley física (y no metafísica), pusieron en marcha un desafío a la autoridad religiosa que a la larga iba a generar toda una filosofía social alterativa. En los agitados tres siglos posteriores, la ciencia reemplazó a la religión como fuerza dominante en la estructuración social. El ejemplo de la astronomía, que tan impresionantes éxitos consiguió al aplicar los principios científicos racionales, fue seguido por la física, la química, la geología, la ingeniería y la biología.

Pocos negarán que la ciencia es eficaz como técnica analítica para explorar fenómenos y sistemas inexplicables, como un marco de referencia para la comprensión y la comunicación de los datos sobre el mundo físico y como base para controlar nuestro entorno mediante la tecnología. Sin embargo, y a pesar del enorme progreso intelectual y social que puede atribuirse de forma directa al avance científico, muchos piensan que a la ciencia y a la tecnología les falta algo de aquella mística con que antiguamente se miraba a la naturaleza. Desde el simple recelo al rechazo total de los valores científicos, la sociedad moderna, y la juventud en particular, está reaccionando en contra de la ciencia.

¿Por qué, pues, en este ambiente adverso, la astronomía ejerce aún la misma fascinación que en nuestros antepasados? En parte esto puede ser debido a los vestigios de sobrenaturalidad que todavía siguen asociados con el Cosmos. Además, de entre todas las ramas de la ciencia, la astronomía es la que se considera la más "limpia". Si se quiere echar a alguien la culpa de la bomba atómica, de la contaminación industrial, de la revolución informática o del exterminio de las ballenas, no se echará a los astrónomos. Los descubrimientos de éstos no amenazarán su puesto de trabajo con nuevas tecnologías ni su vida con nuevos armamentos. La propia lejanía del espacio exterior hace de él un lugar seguro para ejercitar los afanes investigadores de la mente.

Sean cuales fueren las razones fundamentales de este gran interés popular por la astronomía y la astrofísica, no faltan temas para intrigar a los más interesados. Desde la Segunda Guerra Mundial el ritmo de los avances tecnológicos y de los descubrimientos en la astronomía ha sido vertiginoso. En primer lugar se desarrolló el radiotelescopio como resultado de las investigaciones en radar y radio durante la guerra. La radioastronomía abrió una ventana totalmente nueva al Universo, al descubrir la existencia de objetos que hasta aquel momento habían pasado desapercibidos, por el hecho de que emitían ondas radioeléctricas. Los radiotelescopios ensancharon los límites del Universo observable y contribuyeron de forma directa al descubrimiento de nuevos y extraños objetos. También posibilitaron la observación de objetos ya familiares bajo una perspectiva diferente y se estudiaron procesos que se detectaban muy poco o no se podían observar ópticamente.

La atmósfera de la Tierra impide el paso de todas las ondas electromagnéticas, con excepción de la luz y las ondas de radio, de forma que los astrónomos tuvieron que aguardar al desarrollo de los satélites artificiales para ampliar el espectro de longitudes de onda en las que se pudiera observar el Universo. En los años sesenta y setenta se establecieron ramas completamente nuevas de la astronomía: se pusieron en órbita telescopios de rayos infrarrojos, de rayos X y de rayos gamma, los cuales enviaron un diluvio de información sobre los sistemas cósmicos, tanto los próximos como los lejanos. Hoy en día los desarrollos tecnológicos continúan y los teóricos han de trabajar duro para seguir el ritmo de las observaciones. A finales de los años sesenta entraron en escena los asombrosos te-

lescopios de neutrinos, instrumentos capaces de "ver" en el centro del Sol mediante la detección de una de las partículas subatómicas más esquivas de la naturaleza. El primer telescopio de neutrinos no se puso en órbita alrededor de la Tierra, sino que se instaló un kilómetro y medio bajo tierra en Dakota del Sur. Pero los astrofísicos han construido instrumentos aún más sorprendentes, como los telescopios de ondas gravitacionales. Estos telescopios están formados por grandes barras de metal capaces de detectar las ondas gravitacionales procedentes de la superficie de los agujeros negros y de otros objetos exóticos.

Estos grandes avances han mostrado que el Universo es mucho más complejo y desconcertante de lo que se sospechaba hace un par de décadas. Han revelado un Cosmos de una violencia y una potencia inimaginables, pero también majestuoso, apacible y bello. Es evidente que nuestra comprensión del mundo más allá del firmamento está en su infancia y que sólo estamos empezando a vislumbar vagamente cuál es la verdadera naturaleza del hombre y su relación con el Universo.

Una de las lecciones más saludables que hemos aprendido de la moderna astronomía es la de que la Tierra es completamente insignificante comparada con la inmensidad del Cosmos. Esto no solamente quiere decir que el Universo es grande, aunque desde luego es más grande de lo que nadie pueda llegar a imaginar. El descubrimiento que nos hace más humildes es el de que el astro que una vez se creyó el centro de la creación no es más que un lugar de lo más común. La Tierra, los planetas, incluso el Sol, no son más que algunos de los incontables miles de millones de cuerpos similares esparcidos por todo el espacio sin límite aparente. Nuestro Sol no es sino una estrella típica y normal, como los millones y millones de estrellas que nos rodean y que se agrupan con sus vecinas en una gigantesca estructura en forma de disco que llamamos la galaxia de la Vía Láctea. Esta galaxia –la nuestra– contiene alrededor de cien mil millones de estrellas, que junto con grandes cantidades de gas y polvo se arremolinan como en una gran rueda de fuegos artificiales y que giran alrededor de su centro una vez cada 250 millones de años aproximadamente. Presenta un núcleo central, en el que las estrellas se agrupan más densamente, rodeado por varios brazos enrollados a su alrededor formando una especie de espiral. El Sol está situado cerca en uno de estos brazos.

La Vía Láctea es muy grande. La luz, que viaja a la asombrosa velocidad de 300.000 kilómetros por segundo, tarda más de 100.000

años en atravesarla de un lado a otro. Para hacernos una idea de la extraordinaria velocidad de la luz, basta decir que tarda solamente 500 segundos en recorrer los 150 millones de kilómetros de distancia que separan el Sol de la Tierra. Dado que las distancias astronómicas son tan grandes, conviene medirlas en años luz mejor que en kilómetros. Un año luz equivale a unos 9,5 billones de kilómetros. Así pues, nuestra Vía Láctea tiene 100.000 años luz de diámetro.

Las galaxias son los "átomos" de la cosmología, los bloques básicos de que consta el Universo. Con los modernos telescopios se pueden observar muchos miles de millones de galaxias; es decir, miles de millones de estructuras gigantescas, cada una de las cuales contiene un promedio de cien mil millones de estrellas como el Sol. Una galaxia vecina, cercana a la nuestra, es la Gran Nebulosa de Andrómeda, apenas perceptible a simple vista. Se halla a algo más de un millón y medio de años luz de nosotros. Las galaxias más distantes que se conocen están a varios miles de millones de años luz de nosotros y no existe razón alguna para dudar de que si pudiésemos observar a distancias superiores encontraríamos todavía más galaxias. En realidad puede ser que el número de galaxias sea infinito.

Pocas personas habrán podido evitar el sentirse interesadas por el extenso panorama que ofrece la moderna astronomía, pues excepto un reducido número de especialistas que han disfrutado del lujo de muchos años de apasionante estudio, los nuevos descubrimientos les parecerán a la mayoría desconcertantes e incluso incomprensibles. Mi propia experiencia en la enseñanza de la astronomía fundamental y la cosmología –el estudio de la estructura del Universo a gran escala y de su evolución– me ha permitido observar que la gente está extraordinariamente interesada en los agujeros negros, el *big bang*, los pulsars y demás, pero tiene muy poca idea de lo que estos nombres significan realmente.

En muchos aspectos los años setenta fueron los años de los agujeros negros; incluso en el final de la década se estrenó una película de Walt Disney con este mismo título. El público tiene una vaga idea de que los agujeros negros son unos objetos astronómicos peculiares que succionan materia y ya no la dejan escapar. El agujero negro es sin duda un objeto fascinante y asombroso, pero en sí mismo no es más que un formalismo científico. Incluso antes de que se adoptara el término "agujero negro", los astrofísicos estaban más interesados en lo que hay dentro del agujero, la llamada singularidad.

Lo que preocupaba profundamente a los astrofísicos era la in-

soslayable predicción, hecha ya en 1939 basándose en la física ortodoxa, de que una estrella se podía colapsar sin límite hasta reducirse, literalmente, a un punto. La razón por la cual esta cuestión se convirtió en preocupante durante los sesenta fue el descubrimiento de que existen realmente estrellas para las cuales esta catastrófica desaparición es posible. Dado que en la ciencia no existe precedente de que algo se convierta en nada, la desaparición del Universo físico de toda una estrella es desde luego un caso singular, y los científicos utilizan la palabra "singularidad" para este hecho.

Algunos físicos consideran que la singularidad es el fin del espacio y del tiempo, un camino de escape del Universo hacia nada que nadie conozca. Otros lo miran como la desintegración de las leyes de la naturaleza conocidas. Cualquiera de estos dos aspectos está de acuerdo con John Wheeler, el astrofísico que acuñó el nombre de agujero negro y que ha contribuido mucho al conocimiento tanto de agujeros negros como de singularidades, en que la singularidad es la mayor crisis que las ciencias físicas hayan afrontado jamás. En los próximos capítulos veremos por qué Wheeler emitió una opinión tan contundente. La singularidad puede representar el límite de la propia ciencia, el punto de contacto entre lo natural y lo sobrenatural.

El lector pensará ¿que puede hacer colapsar una estrella hasta la nada? La respuesta, breve, es la gravedad. La gravedad, la fuerza que nos mantiene sobre el suelo, que controla el movimiento de las estrellas y de los planetas, que provoca las mareas en los océanos. La gravedad es la más familiar y, aparentemente, la más inocua de todas las fuerzas de la naturaleza. Y sin embargo posee en sí misma el poder y la capacidad de aplastar no solamente a toda la materia sino también al espacio y al tiempo. Fue la gravedad la que, con la caída de la manzana, encauzó a Newton en el camino que condujo a la gran revolución científica de fines del siglo XVII.

¿Qué cosa puede ser más natural y a la vez más misteriosa que la caída de una manzana? ¿Por qué cae la manzana? La respuesta es que la Tierra la atrae con una fuerza que llamamos gravedad. ¿Pero cómo sabe la manzana que la Tierra está ahí? ¿Cómo le llega el mensaje que dice "cae en esta dirección" a una manzana sin soporte? Newton no llevó a cabo ningún intento de explicar el mecanismo de comunicación, sino que simplemente observó que la gravedad actúa "a distancia", a través del espacio vacío, sin ningún medio visible de contacto o influencia.

Esta idea, misteriosa o no, está sobre la pista correcta, ya que en

todo el Universo que nos rodea la gravedad se ejerce de un cuerpo a otro, atrayendo siempre de forma implacable a la materia hacia otra materia. El Sol atrae a la Tierra, la Tierra atrae a la Luna, la Luna atrae a Neil Armstrong y así sucesivamente. El inmenso conjunto de estrellas que componen la Vía Láctea, del cual nuestro sistema solar no es más que un fragmento, permanece unido por la universal y omnipresente fuerza de la gravedad.

Dondequiera que miremos vemos a la gravedad en acción. Es importante darse cuenta de que la gravedad no sólo atrae a un cuerpo hacia otro cuerpo, sino que también atrae a cada cuerpo hacia sí mismo. Debido a esta atracción constante el Sol no se desintegra en el espacio en su combustión, los planetas mantienen una capa atmosférica, las estrellas se agrupan en conglomerados, algunos pequeños y otros mayores. La gravedad conserva siempre la misma tendencia: atrae una materia hacia otra. Está presente en cada átomo, nada escapa a su alcance; incluso la minúscula fuerza de la gravedad entre bolas de plomo se puede medir en el laboratorio. Cuanta más materia hay, mayor es la atracción. Así, la Luna, que contiene algo más del uno por ciento de la masa de la Tierra, tiene una gravedad en su superficie de alrededor de una sexta parte de la que hay en la Tierra. En cambio, en Júpiter, que posee una masa 318 veces mayor que la de la Tierra, un hombre medio vendría a pesar unos 200 kg.

De hecho, la historia del Universo es en realidad una historia de lucha contra la gravedad. La Tierra se mantiene estable contra su propio peso debido a las fuerzas de los materiales sólidos (fuerzas de origen electromagnético) de su interior. El Sol soporta su carga aún mayor mediante la inmensa presión del gas contenido en el interior de su horno central. Cada objeto que existe debe poseer los medios para impedir su propio colapso. En cuerpos de masa relativamente baja, la lucha contra la gravedad se gana fácilmente. En nuestros propios cuerpos la gravedad es en realidad tan débil que no notamos que exista ninguna fuerza que trate de prensarnos (aunque sentimos la fuerza enormemente mayor de la gravedad de la Tierra). Sin embargo, la gravedad es acumulativa, y cuanta mayor cantidad de materia tengamos mayor será la fuerza de atracción, hasta el punto que puede llegar a superar todas las fuerzas que la naturaleza pueda reunir contra ella. Se vuelve avasalladora. Cuando un cuerpo está sometido a una gravedad tan grande que no puede soportar su propio peso, sobreviene la catástrofe y el cuerpo se colapsa. En los próximos capítulos seguiremos el desarrollo

de este destino. Por ahora diremos simplemente que si el Sol tuviera una masa diez veces superior (lo cual no es nada fuera de lo común en una estrella) al final no podría mantenerse. Por tanto, el colapso gravitatorio es algo que se debe tener en cuenta seriamente. Veremos que las estrellas, lejos de poseer la forma natural en que se presenta la materia cósmica, son sólo un interludio temporal entre las difusas nubes de gas de las que nacen y los objetos totalmente colapsados –las singularidades– en que van a morir.

No sólo las estrellas, sino todos los objetos (incluso nuestros propios cuerpos) son en principio inestables ante el colapso gravitatorio. Cada cuerpo tiene en sí mismo sus propios medios de autodestrucción. La razón por la cual en este contexto no consideramos más que las estrellas gigantes es debido a una propiedad fundamental de la gravedad conocida desde los tiempos de Newton. Todos los cuerpos atraen a los demás con la fuerza de la gravedad, pero la magnitud de esta atracción disminuye con la separación entre los cuerpos. El Sol atrae a Mercurio (el planeta más interior) con una fuerza mucho mayor que aquella con la que atrae a la Tierra. Para permanecer en una órbita estable cada planeta debe estar sometido a una fuerza que contrarreste la atracción gravitatoria del Sol. La fuerza centrífuga debida a la rotación del planeta alrededor del Sol es la que proporciona el equilibrio. La mayor parte de los planetas se mueven en órbitas casi exactamente circulares con el Sol en el centro. En este caso simétrico, la fuerza centrífuga es igual en magnitud a la fuerza gravitatoria del Sol, pero dirigida en sentido contrario, es decir, hacia el exterior, alejándose del Sol. Si se alterara el equilibrio entre estas fuerzas, el planeta ajustaría sus características orbitales hasta que dichas fuerzas se equilibraran de nuevo, por ejemplo acercándose o alejándose del Sol. En el caso de Mercurio la mayor atracción del Sol debe ser contrarrestada por una mayor velocidad de revolución para producir una fuerza centrífuga mayor. Así el año en Mercurio tiene una duración de sólo 68 días terrestres. Por tanto la medida del período orbital de un planeta (es decir un año) se puede utilizar como medida de la fuerza gravitatoria que el Sol ejerce sobre él.

La comparación entre los períodos orbitales de todos los planetas, con su abanico de diferentes distancias al Sol, revela la exacta forma matemática en que la gravedad del Sol disminuye hacia la periferia del sistema solar. El resultado –la llamada ley gravitatoria del inverso del cuadrado de la distancia, de Newton– fue un descubrimiento capital en el progreso de la ciencia. Los físicos y los matemáticos han echado mano de esta ley básica en innumerables ocasiones en los tres siglos que han transcurrido desde que fue propuesta: tanto para estudiar el movimiento de los planetas, asteroides, estrellas y galaxias, como para elaborar modelos de la evolución de las inmensas nubes de gas de nuestra galaxia, y también modelos de la estructura interna de las estrellas, del Sol y de la Tierra, para calcular las trayectorias de cohetes y proyectiles, y mucho más...

¿Qué quiere decir "ley del inverso del cuadrado de la distancia"? Es una forma de describir una de las relaciones numéricas más simples que se puedan imaginar entre la fuerza de atracción gravitatoria y la distancia desde el cuerpo que la provoca con respecto al cuerpo atraído. La relación dice, en esencia, que cuando doblamos la distancia la fuerza disminuye a una cuarta parte del valor que tenía. Así, si transportáramos la Tierra a 300 millones de kilómetros del Sol (en lugar de su distancia real de 150 millones de kilómetros) no experimentaría más que el 25 % de la fuerza de atracción del Sol que sufre en su estado actual, y orbitaría mucho más lentamente (dando lugar a un año más largo). Análogamente, si la separación entre la Tierra y el Sol se incrementara a tres veces su valor actual la atracción disminuiría a la novena parte; si la incrementamos cuatro veces disminuye a un dieciseisavo, etc. La regla aritmética está clara: elevar al cuadrado la distancia y tomar el inverso (de ahí la ley del inverso del cuadrado de la distancia). Así, cinco veces la distancia implica 5 x 5 = 25 (elevar cinco al cuadrado) lo que da una fuerza de 1/25 (invertir veinticinco).

La ley del inverso del cuadrado de la distancia constituye el núcleo del extraordinario fenómeno del colapso gravitatorio total. Si bien nuestro ejemplo específico se refiere a la gravedad solar actuando sobre los planetas, la ley es válida para todos los cuerpos del Universo, incluso los átomos individuales. Para darnos cuenta de su importancia en el colapso, consideremos lo que ocurre cuando nos movemos, no ya alejándonos sino acercándonos al Sol (o a cualquier otro cuerpo). Si la gravedad del Sol disminuye a medida que la distancia del planeta aumenta, así también debe incrementarse cuando el planeta se acerca al Sol. Por la misma ley universal del inverso del cuadrado de la distancia, la gravedad, a una distancia igual a la mitad del presente radio orbital de la Tierra (es decir a 75 millones de kilómetros), es cuatro veces mayor (1/2 x 1/2 = 1/4; invirtiendo 1/4 da 4). A una distancia de un tercio de su radio (50 millones de kilómetros del Sol) la gravedad es nueve veces mayor, y así sucesivamente.

En la figura 1 está representada la fuerza de la gravedad sobre un planeta en función de la distancia que le separa del Sol, es decir, el radio de su órbita (supuesta circular). Una curva similar representaría la atracción gravitatoria producida por cualquier otro cuerpo (por ejemplo, la Tierra, una estrella, una bola de plomo). La curva presenta dos características interesantes. La primera es que la fuerza gravitatoria, a grandes distancias del Sol, tiende sistemáticamente a cero. La segunda es que la curva crece muy rápidamente a medida que nos acercamos al Sol. De hecho, se saldría de la figura. Evidentemente la atracción gravitatoria experimentada al aproximarse al Sol se dispara. La ley del inverso del cuadrado de la distancia indica de qué manera se produce: a una distancia de una centésima parte de la actual asciende a 10.000, a una milésima llega al millón, a una millonésima, al billón. ¿Hasta dónde llega el crecimiento?

Llegado este punto debemos comenzar a pensar un poco más sobre la naturaleza del propio Sol. La órbita de la Tierra tiene un radio de 150 millones de kilómetros, por tanto una millonésima parte de esta distancia no representa más que 150 kilómetros. Pero el Sol es una esfera de 696.000 kilómetros de radio. ¿Desde qué punto del Sol se deben contar los 150 kilómetros? ¿Desde el centro, desde la superficie o desde cualquier otra parte? La ley del inverso del cuadrado de la distancia se aplica de hecho a distancias medidas desde el centro del Sol, por tanto, una millonésima parte de la distancia a la Tierra se refiere a una región muy en el interior del Sol, donde la ley deja de tener validez. La razón por la cual la ley queda invalidada a partir de la superficie solar es que la fuerza de la gravedad la origina todo el material del Sol. En su propio interior, parte del material solar queda arriba, y parte abajo, y por tanto la atracción se produce en sentidos opuestos, como en el juego de la cuerda. En consecuencia, la atracción neta disminuye. A medida que nos acercamos hacia el centro del Sol, el juego de la cuerda es más y más igualado hasta que, en el centro exacto, el material solar atrae igual y simétricamente por todas partes en dirección hacia el exterior. La gravedad pura es allí cero. De forma similar, si pudiéramos perforar un agujero a través de la Tierra hasta llegar al centro de la misma, observaríamos que allí no hay gravedad. Por consiguiente, la ley del inverso del cuadrado de la distancia solamente se aplica siempre y cuando despreciemos la estructura interna del cuerpo que origina la fuerza gravitatoria.

Volviendo a la gráfica de la figura 1, es evidente que la curva ascendente en la parte izquierda comenzaría a estabilizarse y a des-

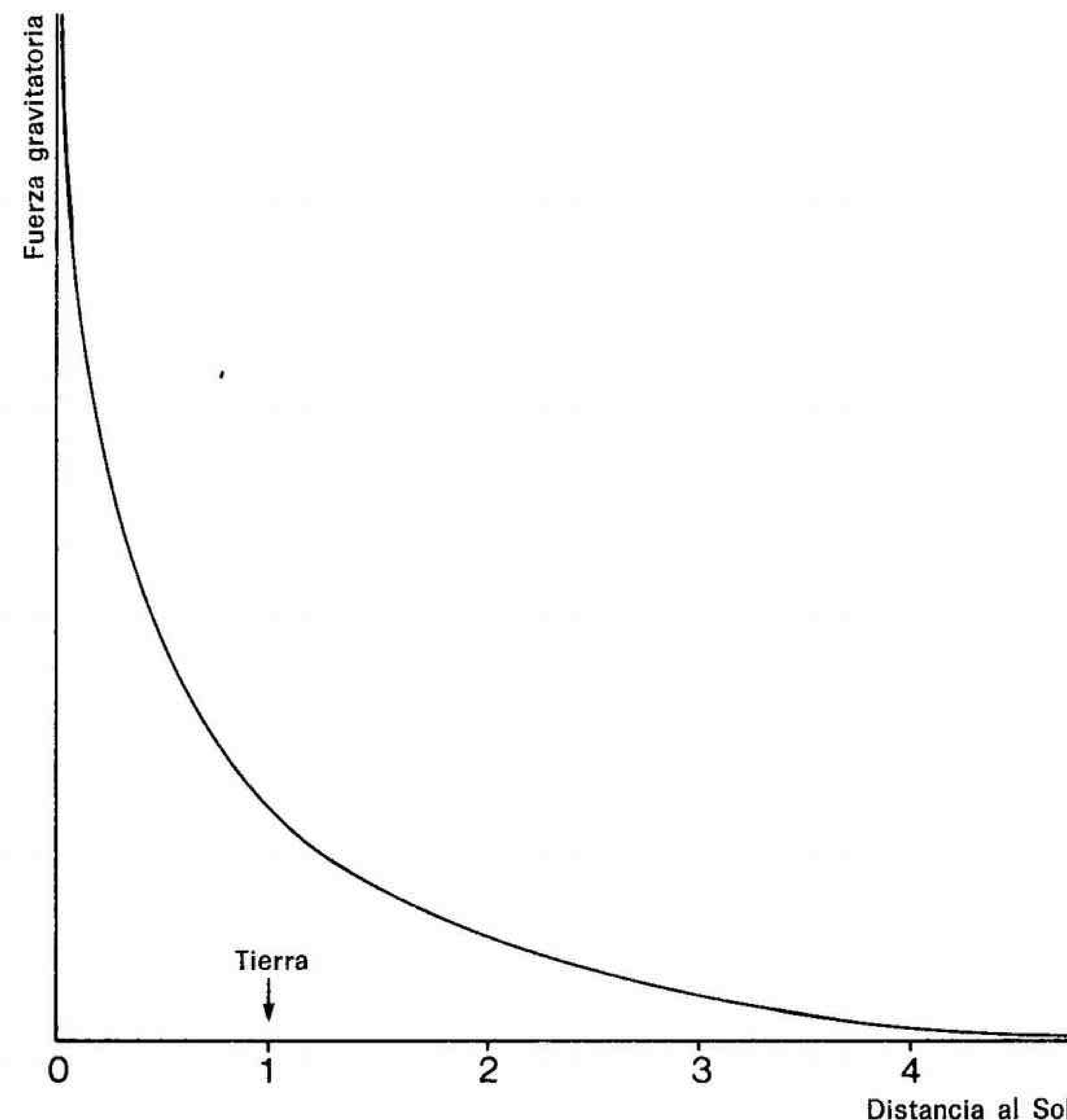


Fig. 1. *La Ley del inverso del cuadrado de la distancia.* La gráfica muestra la fuerza gravitatoria del Sol sobre un planeta como la Tierra en función de la distancia al Sol en unidades del radio orbital de la Tierra. La fuerza crece rápidamente a medida que nos acercamos al Sol.

cender de nuevo al llegar a una distancia igual al radio solar, ya que a partir de esta distancia los efectos de la estructura del interior solar mencionados arriba comienzan a actuar. ¿Pero y si el Sol fuera más pequeño? Entonces la curva llegaría más arriba. Consideremos a fondo las implicaciones que esto representa.

La atracción gravitatoria de la que hemos estado tratando se re-

fiere a la fuerza que experimenta un cuerpo exterior, como la Tierra. Sin embargo, la gravedad del Sol no actúa solamente sobre los planetas, sino también sobre sí mismo. Es decir, el material solar también es atraído hacia el centro del Sol, de la misma forma que la materia de la Tierra es atraída hacia el centro de la misma. Si no fuera por la gravedad del Sol que mantiene unido al material que lo forma, los gases calientes superficiales se evaporarían hacia el espacio. De acuerdo con la ley del inverso del cuadrado de la distancia, la gravedad que se experimenta en la superficie solar depende del radio del Sol. Con su radio actual, la gravedad en la superficie del Sol es unas 28 veces mayor que la existente en la superficie de la Tierra, de forma que un hombre de 100 kg pesaría unos 2.800 kilogramos en el Sol. Pero si éste se contrajese hasta la mitad de su radio actual, conservando la misma cantidad de materia (es decir, la misma masa), el hombre pesaría 4 x 2.800 = 11.200 kg. La gravedad en la superficie del Sol aumentaría cuatro veces. Esto quiere decir que el peso de su propio material depende de lo contraído o dilatado que esté el Sol.

En la continua lucha entre la gravedad y la presión interna, la dependencia del peso con relación al radio del Sol es vital. Supongamos que, por algún procedimiento mágico, estrujáramos el Sol hasta reducirlo a la mitad de su radio. El peso propio del Sol, es decir, el peso del material solar debido a su propia gravedad, se multiplicaría por cuatro. El Sol se sentiría cuatro veces más pesado. Este aumento de peso tendería a intentar contraer aún más el Sol, produciendo un mayor incremento de la gravedad en la superficie, y por consiguiente más peso, y más contracción todavía. Por otro lado, la compresión incrementaría también la presión térmica interna, que lucharía para soportar el peso extra empujando más fuerte hacia afuera. Es una lucha titánica, una lucha de la que, al final, la gravedad siempre saldrá vencedora. Si el Sol pudiera ser contraído a un radio suficientemente pequeño, no habría presión que lo salvara. El radio crítico a partir del cual la gravedad arrollaría a cualquier otra fuerza es, sin embargo extraordinariamente pequeño –alrededor de 1 kilómetro y medio–. Mientras una estrella esté caliente, puede llamar en su ayuda a la presión térmica para que la salve de la tendencia aplastante de una gravedad creciente. Pero cuando una estrella ha quemado todo su combustible y sus reservas de calor y de presión se agotan, sucumbirá a la irresistible fuerza de contracción.

La lógica despiadada de la ley del inverso del cuadrado de la

distancia se aplica no solamente al Sol y a las estrellas, sino a toda la materia. La Tierra, por ejemplo, menos amenazada que el Sol debido a su masa menor, colapsaría no obstante bajo su propio peso si se contrajese hasta el tamaño de una canica. Si se aplastase un ser humano hasta formar una bola de un tamaño algo menor que el de una mota de polvo, experimentaría una fuerza de gravedad propia con una atracción interior tan grande como la atracción que experimenta por parte de la Tierra. Al llegar a un radio de una billonésima de centímetro sería incapaz de impedir la implosión total bajo el inmenso peso de su propio cuerpo, que equivaldría ahora a un millón de billones de billones de billones de toneladas.

La sencilla historia de la lucha de la gravedad por comprimir toda la materia se conoce desde el tiempo de Newton. Sin embargo, no fue sino hasta el presente siglo cuando llegó a apreciarse la íntima conexión entre la gravedad y la naturaleza del espacio y del tiempo. Esta conexión es la que hace que el aplastante colapso gravitatorio suponga mucho más que una crisis de la materia: supone una crisis en la estructura misma de la existencia.

No hay duda de que el general interés popular por la astronomía es en parte el resultado de la extraña naturaleza de la gravedad, en la forma en que afecta al espacio y al tiempo. Palabras como "deformación del espacio" y "deformación del tiempo" son comunes en la ciencia ficción y evocan la idea de que la gravedad puede hacer cosas muy especiales con estas atractivas cualidades. Si bien Albert Einstein sugirió, ya en 1915, que el espacio y el tiempo podían ser "deformados" o distorsionados por la gravedad, para muchas personas de los años ochenta esta idea es todavía una frase que suena un poco extraña. ¿Qué significa realmente una deformación del espacio? ¿Cómo puede la gravedad curvar el espacio si éste no contiene ninguna sustancia que curvar?

La idea básica de que la gravedad distorsiona el espacio y el tiempo no depende de modernos o complicados experimentos científicos, sino que puede deducirse de la más sencilla de las observaciones. En realidad, la idea podía haberla descubierto el propio Newton. Newton, y de hecho ya Galileo antes que él, sabían que si se dejan caer dos objetos desde la misma altura llagarán al suelo al mismo tiempo. Hay una anécdota (probablemete falsa) que cuenta que Galileo intentó una demostración de este tipo, desde la famosa torre inclinada de Pisa, para convencer a los escépticos (cosa que no consiguió). Este escepticismo es a menudo reivindicado, ya que de alguna manera parece que un cuerpo más pesado debería caer

más rápidamente que uno ligero. Sin embargo, los cuerpos pesados también son más masivos, lo que les hace menos prestos a responder a la atracción de la gravedad. Ambos efectos, peso e inercia, se compensan siempre, de forma que el cuerpo cae de la misma manera tanto si es una canica como si es una bala de cañón. Desde luego algunos cuerpos vellosos tales como las plumas caen más despacio, pero esto no tiene nada que ver con la gravedad. Uno de los experimentos más divertidos que se llevaron a cabo durante el programa espacial Apolo fue el que realizó un astronauta repitiendo el experimento de Galileo en las condiciones de vacío de la Luna.

El hecho de que todos los objetos caigan de la misma forma cuando se abandonan implica el que una persona en caída libre se sienta completamente ingrávida. A menudo tenemos una ligera impresión de ello cuando nos hallamos en un ascensor que inicia de pronto su descenso y parece que nuestro estómago "se quede atrás". Imaginemos que dejamos caer el ascensor y éste se precipita libremente hacia el suelo. Dentro del ascensor en caída todos los objetos (gente, perros, bolsos) caen a la misma velocidad y no descienden en relación unos de otros. Por ejemplo, la pipa de uno de los desventurados ocupantes que se hubiese escapado de su boca por la sorpresa del momento, caería de igual manera que el hombre de forma que parecería flotar, ingrávida, frente a su cara. Efectos parecidos ocurren en el paracaidismo, aunque en este caso la resistencia del aire complica las cosas.

Las curiosidades de la ingravidez en caída libre no dejan nunca de ser una atracción. Gran parte del tiempo de televisión dedicado a los astronautas en órbita se emplea en mostrar sus travesuras "flotantes" en el espacio. La nave en órbita no está, como mucha gente erróneamente cree, tan lejos de la Tierra como para que la gravedad sea despreciable. De hecho, la gravedad en órbita es a menudo sólo un pequeño porcentaje más reducida que en la superficie de la Tierra; algunas naves están solamente a unos centenares de kilómetros por encima del suelo. La razón por la cual los astronautas se sienten ingrávidos es porque están en caída libre; los motores de la nave están apagados. En algunas ocasiones esto causa confusión dado que, aunque la nave en órbita esté cayendo, no llega a alcanzar al suelo. Ello es debido a que la Tierra es redonda, y además de estar cayendo hacia el suelo, la nave también se mueve a gran velocidad en dirección lateral, de forma que cuando ha caído, digamos, un kilómetro, se ha desplazado tanto horizontalmente que la curvatura de la Tierra ha causado que el nivel del suelo descienda también un kilómetro. La nave no está, pues, más cerca del suelo de lo que estaba antes. Simplemente sigue su caída dando vueltas y vueltas a la Tierra.

Hay otra forma de entender por qué un cuerpo en caída libre está ingrávido. Cuando un objeto cae acelera hacia abajo; no obstante, la aceleración produce una sensación exactamente igual a la de la gravedad. Por ejemplo, cuando un coche acelera rápidamente hacia adelante, sentimos un empuje hacia atrás. Por poner otro ejemplo, en los tiovivos de los parques de atracciones, la fuerza centrífuga hacia afuera se experimenta como si fuera una fuerza gravitatoria. A menudo, a la fuerza producida por un sistema que dé vueltas se le llama "gravedad artificial" y no se distingue en sus efectos locales de la gravedad real. Se está planificando la construcción de una gran estación espacial, en forma de rueda, que gire lentamente con el fin de simular el efecto de la gravedad en su periferia.

La rotación es una forma de aceleración, y cualquier clase de aceleración produce "gravedad artificial". Por tanto, cuando se suelta un cuerpo, al acelerar éste hacia abajo siente una fuerza de gravedad artificial hacia arriba que se cancela exactamente con la gravedad de la Tierra, produciendo la ingravidez. De la misma forma, la ingravidez de un cuerpo en órbita circular alrededor de la Tierra se puede considerar como la exacta cancelación de la gravedad de la Tierra por la fuerza "centrífuga".

Estas consideraciones sobre la ingravidez en caída libre son bastante sencillas, pero ¿qué relación tienen con la deformación del espacio? Miremos un poco más detenidamente lo que ocurre en el interior del ascensor que está cayendo. A primera vista todo parece estar flotando en su sitio, desde el punto de vista del ocupante, manteniendo su posición relativa a los demás objetos y a las paredes del ascensor. Pero experimentos muy precisos mostrarían un ligero cambio, casi imperceptible. Por ejemplo, supongamos que disponemos cuatro objetos en forma de rombo tal como muestra la figura 2. A medida que cae el ascensor todos ellos caen de igual manera y la forma no cambia. ¿O sí lo hace?

Los dos objetos laterales del rombo caen de forma exactamente vertical. Pero la Tierra no es plana, desde luego, de manera que la dirección vertical local cambia de un lugar a otro. Dado que la separación entre los objetos es pequeña, las verticales locales en cada uno de ellos estarán ligeramente inclinadas respecto al otro. De he-

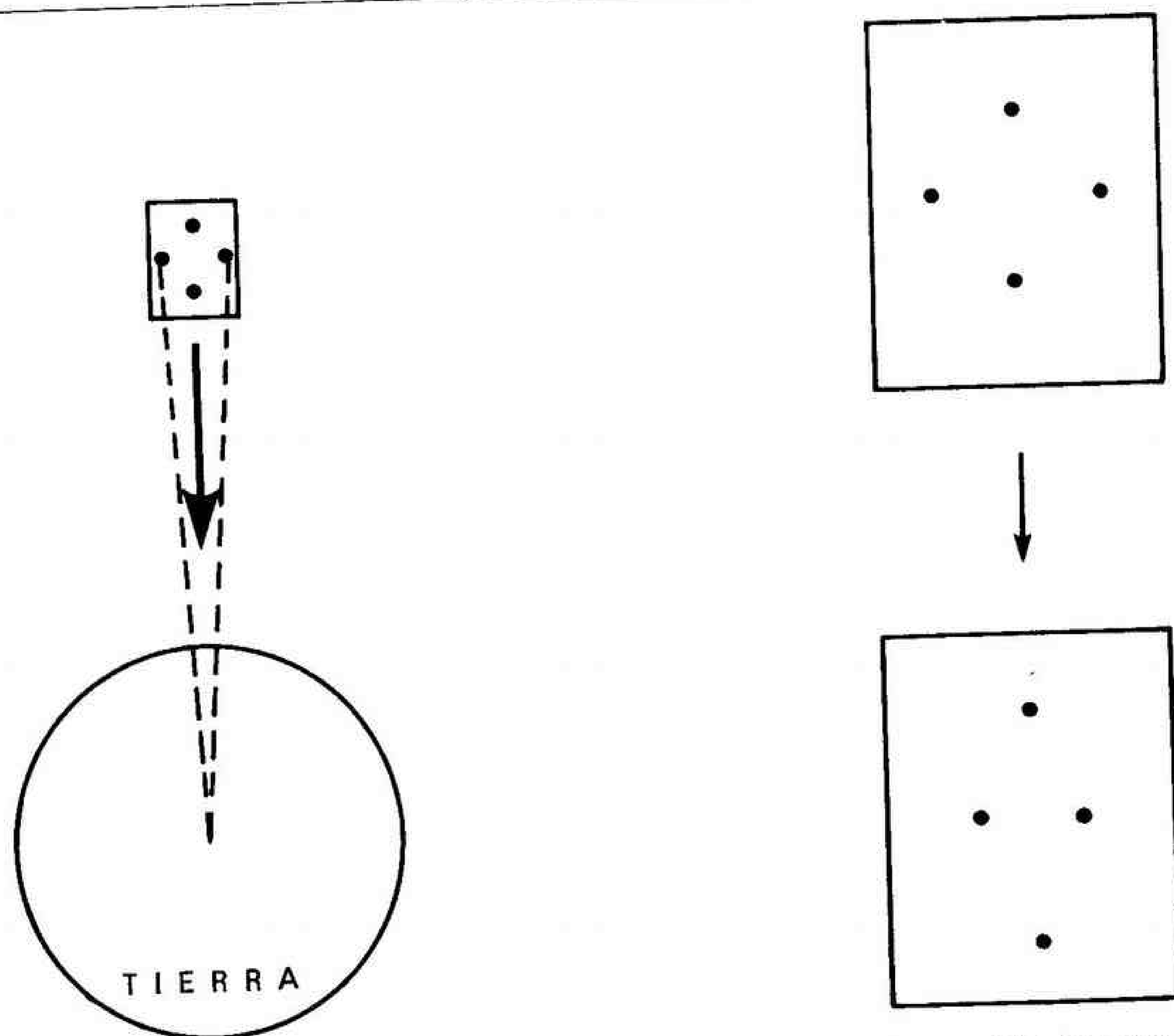


Fig. 2. *Distorsión gravitatoria.* A medida que el ascensor va cayendo, las cuatro partículas en caída libre experimentan una gravedad ligeramente diferente, de manera que la forma cuadrada se convierte en un rombo al converger las dos partículas laterales hacia el centro de la Tierra, mientras que las partículas superior e inferior se separan debido a la pequeña diferencia existente en su proximidad a la Tierra. Einstein mostró que esta distorsión geométrica era debida en realidad a la distorsión del espacio-tiempo más que a pequeñas diferencias en las fuerzas gravitatorias.

cho en lugar de caer según caminos paralelos, las partículas caen directamente hacia el centro de la Tierra. Es decir, si el ascensor siguiera cayendo por un túnel excavado a través de la Tierra, los dos objetos laterales del rombo convergerían en el centro.

De forma similar, el objeto que está en la base del rombo está siempre un poco más cerca de la Tierra que sus vecinos, de manera que según la ley del inverso del cuadrado de la distancia la gravedad que actúa sobre el objeto inferior es un poco mayor que la que

actúa sobre los otros. En consecuencia, cae ligeramente más rápido. Por otra parte, el objeto situado en la parte superior del rombo queda rezagado detrás de los otros. El resultado final de todas estas pequeñas, pero crucialmente significativas diferencias, es que el rombo se va alargando a medida que cae hasta que, en el centro de la Tierra, se aplana totalmente al tocarse las "caras".

Estos pequeños efectos se deben a una ligera variación de la gravedad de la Tierra de un lugar a otro. En caída libre, los cuerpos quedan completamente libres de la sensación de gravedad, salvo esas pequeñas variaciones. Para un cuerpo que cae la gravedad solamente se manifiesta por los pequeños cambios de posición causados por las partículas ingrávidas que se juntan o se separan. Además, dado que *todos* los cuerpos, sean ligeros o pesados y con independencia del material de que estén hechos, están sujetos a las mismas experiencias (recuérdese el experimento de Galileo), la "fuerza de la gravedad", de la que a menudo se habla muy a la ligera, comienza a no parecer en absoluto una fuerza. De hecho, para un cuerpo que cae la gravedad se reduce a una gradual distorsión de formas. Dejemos caer un rombo y tomará una forma alargada; dejemos caer un anillo flexible y se aplanará tomando una forma oval.

Todas estas observaciones sugieren que deberíamos olvidarnos de nuestras reflexiones sobre la "fuerza de la gravedad" y utilizar en cambio el lenguaje de la geometría, para hablar de efectos gravitatorios. Ésta fue la gran idea de Einstein. Se puede suprimir la gravedad como fuerza y reemplazarla por geometría. La gravedad *es* geometría. Es una concepción audaz, radical, pero la teoría detallada de la gravedad como geometría ha sido experimentada una y otra vez. Ninguna otra teoría alternativa que no utilice esta idea central ha resistido al riguroso escrutinio de los modernos experimentos.

¿Entonces qué es la deformación del espacio? El rombo que cae se deforma, su forma se distorsiona. Este fenómeno no es una propiedad del propio rombo, ya que se lograría una distorsión similar con cualquier otro objeto en su caída. Debe ser considerado como una propiedad del espacio. Es el espacio el que se distorsiona; el rombo sólo se desliza libremente por un espacio curvado.

Podemos empezar ya a vislumbrar la idea de la deformación del espacio, aunque ésta parezca todavía descabellada. ¿Cómo puede doblarse el espacio? El espacio es el vacío; el vacío no puede tener forma. Una analogía inmediata puede ayudar a arrojar un poco más de luz sobre lo que se quiere decir al hablar de espacio curvado.

Consideremos dos aviones que están en el Ecuador separados por una distancia de diez kilómetros. A los pilotos se les dan las instrucciones de volar exactamente hacia el norte. Los aviones emprenden rutas paralelas y los pasajeros se acomodan para un largo viaje. Al cabo de un rato se dan cuenta de que los aviones parecen estar ligeramente más cerca de lo que estaban antes. Esto es desconcertante, ya que comenzaron el vuelo exactamente en paralelo, y cada piloto vuela de forma precisa hacia el norte, sin ninguna desviación. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo los aviones se acercan más y más hasta que, en el Polo Norte, ocurre el desastre: los aviones chocan. Cualquier error de los pilotos queda descartado, ya que ambos volaron siempre exactamente hacia el norte. ¿Qué es lo que ha ocurrido?

La respuesta no está, desde luego, en ninguna fuerza que atraiga los aviones el uno hacia otro, sino en la curvatura de la superficie terrestre (véase figura 3). A pesar de que las líneas de longitud son exactamente paralelas en el Ecuador, hacia el Polo Norte no siguen siéndolo, sino que convergen lentamente. En el Polo Norte estas líneas inicialmente "paralelas" se cruzan. Volando por estas paralelas, los pilotos estaban abocados al desastre polar. En una superficie curvada las líneas paralelas pueden cortarse.

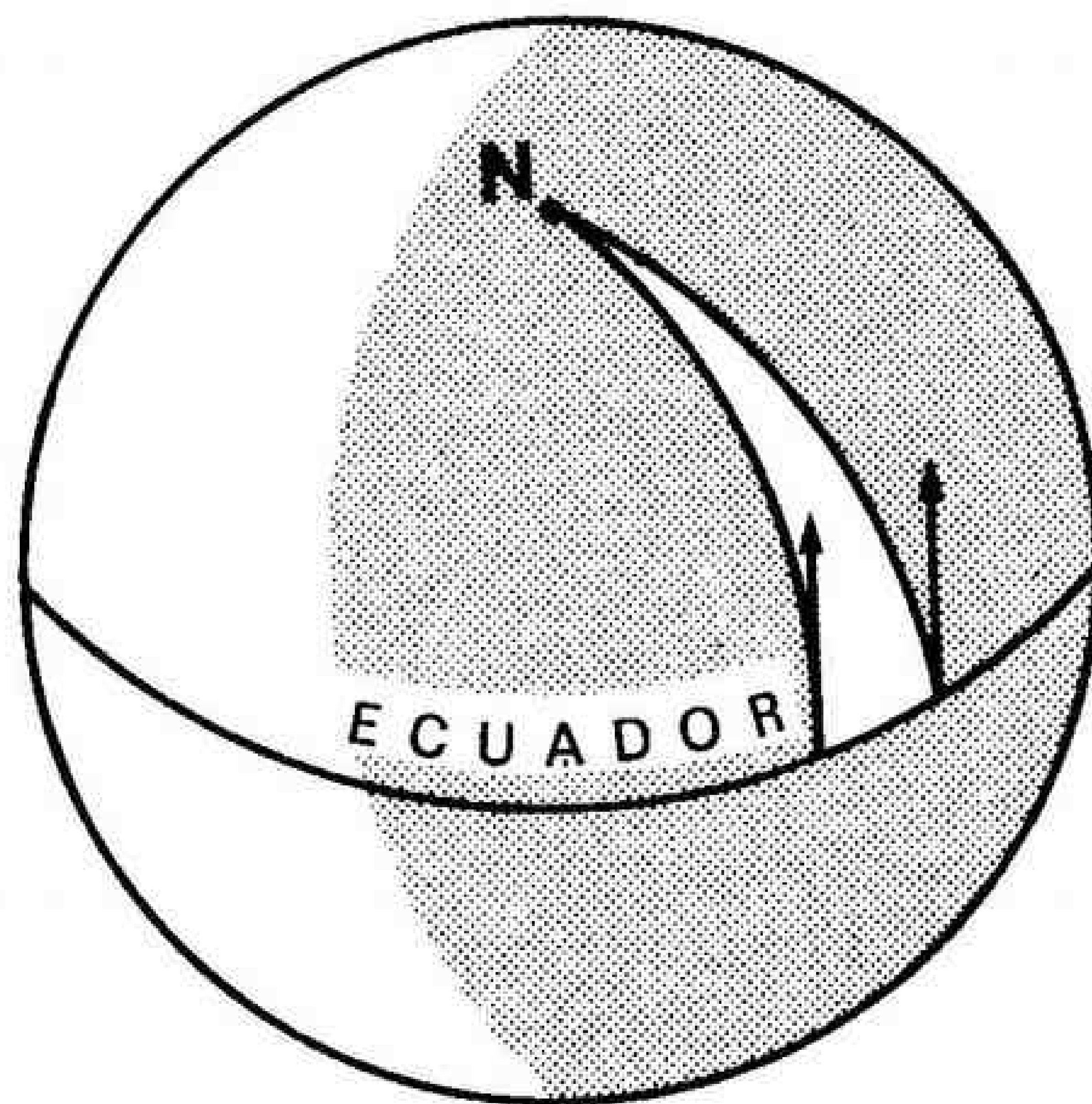


Fig. 3. Dos líneas de longitud, exactamente paralelas en el Ecuador, convergen no obstante y se tocan en el Polo Norte: dos aviones que vuelan exactamente hacia el norte según estas líneas, parecen atraerse gradualmente. La explicación no es, sin embargo, la presencia de fuerzas, sino la distorsión geométrica debida a la esfericidad de la Tierra.

La situación recuerda la caída de nuestro rombo. En lugar de inventar una fuerza misteriosa (la gravedad) que complique el por qué los objetos laterales del rombo convergen lentamente, más bien deberíamos decir que por un espacio curvado los objetos "vuelan", libremente. El centro de la Tierra es como el Polo Norte para los pilotos. Es el lugar donde colisionan los bordes del rombo. Y la distorsión o deformación del espacio es como la deformación de un mapamundi en la proyección de Mercator, en la que la única manera de representar la Tierra esférica sobre una hoja plana es alargando enormemente las distancias cerca de las regiones polares.

En realidad, en el caso de la gravedad la deformación no es, estrictamente, una deformación del espacio, sino una deformación del espacio-tiempo. La gravedad afecta tanto al tiempo como al espacio, y el resultado de ello es que el espacio y el tiempo están íntimamente entrelazados, tal como veremos en el capítulo 3.

Un buen lugar para observar una deformación del espacio en acción es cerca del Sol, que es el mayor objeto gravitante del Universo cerca de nosotros. Sir Arthur Eddington llevó a cabo semejante intento en 1919 como un test crucial de la teoría de Einstein. La idea es que al moverse el Sol a través del cielo (hecho que en realidad es debido al movimiento de la Tierra) va haciéndolo lentamente a lo largo de las constelaciones del Zodíaco. La deformación del espacio por el Sol distorsiona ligeramente las formas de las constelaciones cuando las vemos cerca del mismo, desplazando ligeramente las posiciones aparentes de las estrellas, igual que una lente. Este efecto se puede apreciar durante un eclipse solar, cuando la Luna tapa el resplandor del Sol y permite ver las estrellas de día. Una cuidadosa comparación de la posición de las estrellas que aparecen cerca del Sol (es decir, cerca de la línea de visión dirigida hacia él) con las mismas posiciones registradas cuando el Sol está en otra parte del cielo, nos revelará precisamente el efecto deformador de la gravedad solar (véase capítulo 3).

¿Cómo se puede visualizar ese concepto tan peculiar y poco familiar como es el del espacio deformado? La superficie de la Tierra nos da una pista. Se puede visualizar fácilmente una superficie torcida, curvada o deformada (véase figura 3); por ejemplo, la superficie de un globo, o la topografía de un terreno montañoso. Sin embargo, el espacio no es una superficie. Para empezar, es tridimensional. Esto dificulta imaginar cómo puede ser una distorsión o una cur-

vatura, pero la idea básica obviamente no depende de la dimensionalidad. Si podemos tener curvatura en una dimensión (una línea curva) y en dos dimensiones, ¿por qué no en tres, o incluso en cuatro (el espacio-tiempo)? Todo lo que esto significa es que las habituales reglas de la geometría escolar (como por ejemplo, que los ángulos de un triángulo suman dos ángulos rectos) ya no son estrictamente ciertas, sino simples aproximaciones. Para ayudar a visualizarlo, a menudo representaremos al espacio como una superficie en lugar de un volumen. Este recurso es una simplificación no más extraña que dibujar una sección bidimensional de una casa, o de una pieza de maquinaria, como tan a menudo hacen los arquitectos y los ingenieros.

Pero todavía nos queda una sensación de incomodidad cuando hablamos del espacio curvado. Aceptando el hecho de que la curvatura tridimensional tenga sentido, ¿qué significa exactamente esta curvatura? La superficie de un globo, por ejemplo, es una membrana de goma. El espacio no es nada.

Quizá uno de los grandes descubrimientos del siglo XX sea la constatación de que el espacio realmente sí es "algo". En cierta manera se parece a un trozo de goma que llena el vacío entre los cuerpos. (En consecuencia, a menudo lo concebiremos como una membrana de goma en nuestro punto de mira bidimensional.) Aunque no podemos sentir ni tocar el espacio, en el sentido de cualquier sustancia, sin embargo se le puede curvar, estirar y retorcer. Veremos en próximos capítulos cómo, por ejemplo, el espacio intergaláctico se está estirando continuamente. Veremos que durante el colapso gravitatorio catastrófico, el espacio puede torcerse hasta tal punto que la "goma" se rompe y el espacio se divide en las junturas. Veremos también que el tiempo puede estirarse de esta manera y también "romperse" y descomponerse.

Una vez aceptemos que el espacio puede curvarse, aparece una nueva posibilidad interesante.Tal como dijimos anteriormente, pensemos en el espacio como en una lámina o membrana bidimensional y consideremos las experiencias de una criatura bidimensional que se arrastra por la superficie. Si la criatura es pequeña no se dará cuenta de los bultos y protuberancias locales, ya que en una región suficientemente pequeña el espacio parece plano (de la misma forma que la curvatura de la Tierra sólo se hace evidente a gran escala). Si dicha criatura no a leído a Einstein, pensará probablemente que su Universo es una lámina plana infinitamente extensa. En una inspección más detenida estimará que esta superficie es un

tanto accidentada, por lo que considerará que es una lámina con abolladuras que se extiende sin fin en todas direcciones. Después hace un tremendo descubrimiento. Está viviendo, no en una lámina infinita, sino en la superficie de un globo con abolladuras. Su Universo no es una extensión infinita, sino que se curva y se junta consigo mismo. Su espacio no solamente está curvado, sino que además está unido consigo mismo y es de área finita. La criatura va por todas partes, "visita" completamente su Cosmos. No encuentra en ninguna parte un borde, o un límite o una barrera donde el espacio "acabe". Pero es finito en extensión. Puede recorrerlo por todas partes y volver al lugar de partida.

¿Es así nuestro Universo, curvado todo alrededor de tal manera que se une consigo mismo? ¿Tiene un volumen finito, aun sin tener un borde o una barrera? Quizá. Examinaremos estos puntos en detalle en sucesivos capítulos.

Los matemáticos han ideado una disciplina totalmente dedicada al análisis de cómo las líneas, superficies y volúmenes se unen consigo mismos y con otros. Se llama topología. Un topólogo no está interesado en la información geométrica detallada, tal como lo grande que es un objeto, o los bultos de un determinado tamaño que pueda tener, sino solamente en cuestiones tales como si una superficie bidimensional es infinita o cerrada como un globo, o si una cuerda tiene o no nudos.

Tendremos ocasión de usar a menudo la topología en este libro, y por lo tanto daremos aquí unas ideas generales para familiarizarnos con su mundo. Tomemos por ejemplo dos objetos familiares, una rosquilla y una taza (véase figura 4). Las formas de estos dos objetos son muy diferentes, pero tienen una característica fundamental en común: ambos tienen un "agujero". En el caso de la rosquilla el agujero está exactamente en el medio, mientras que en la taza el agujero está en el asa. No obstante, comparten una propiedad que no tienen, por poner un ejemplo, una patata (ningún agujero) o una jarra de dos asas (dos agujeros). Decimos que la rosquilla y la taza tienen la misma topología, que a su vez se diferencia de las topologías de la patata y de la jarra de dos asas. Obsérvese que las formas o los tamaños no afectan a esta clasificación. De hecho, si imagináramos que estos objetos están hechos de plastilina, podríamos convertir la taza en la rosquilla de forma continua simplemente estirando, doblando y prensando. No habría necesidad de cortar o juntar regiones separadas de plastilina. No ocurriría lo mismo si quisiéramos obtener una forma de patata o de jarra de dos asas.

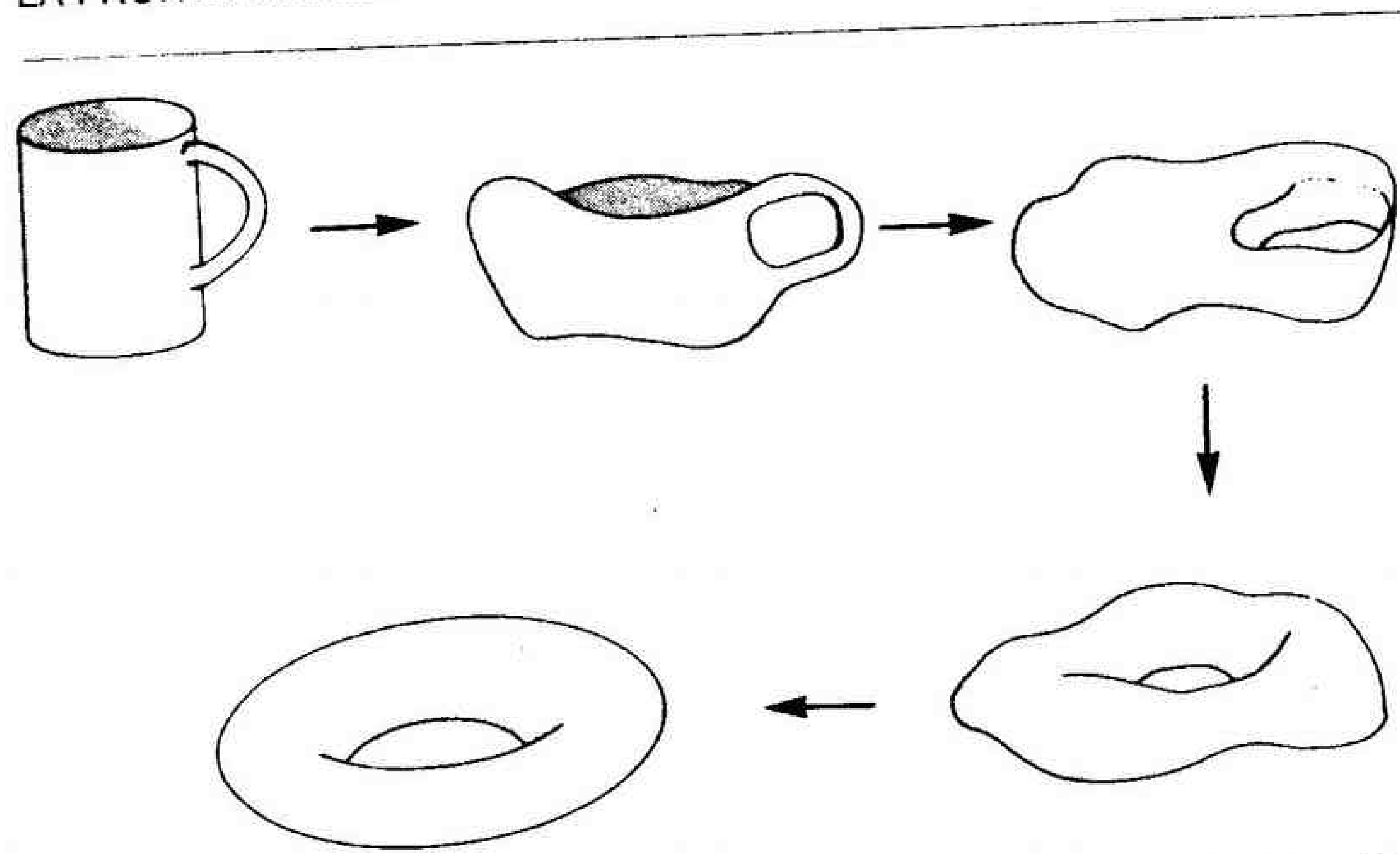


Fig. 4. La topología de la taza y de la rosquilla es la misma, ya que sus figuras pueden deformarse de una a otra de forma continua sin cortar ni juntar.

La topología de las superficies también es un tema interesante. Un famoso y viejo problema, no resuelto hasta fecha reciente, es el llamado problema de los cuatro colores. Está relacionado con el número de colores necesario para rellenar los diferentes países de un mapa de forma que no tengan el mismo color dos países vecinos, por complicado que sea el mapa. De nuevo, la forma exacta de los países es indiferente; lo que importa es la relación general entre unos y otros. Los cartógrafos saben, desde hace tiempo, que en la práctica se necesitan cuatro colores, pero la demostración de que nunca puede existir un mapa suficientemente complicado que requiera cinco o más colores ha supuesto muchos años de esfuerzo.

Otro hecho divertido de la investigación topológica de las superficies es la llamada banda de Möbius. Podemos cambiar la topología de una tira de papel doblándola en círculo y juntando los extremos. El anillo tendrá la geometría de un cilindro, con dos bordes (superior e inferior) y dos caras (interior y exterior). Si en lugar de doblarla en círculo y juntarla de la forma normal torcemos primero la tira antes de doblarla y juntarla, obtendremos un anillo "rizado" –la banda de Möbius– que tiene solamente un borde y una cara, como puede verificarse fácilmente siguiendo un camino alrededor de la tira (véase figura 5). La banda cilíndrica y la de Möbius tienen topolo-



Fig. 5. La topología del anillo de la izquierda es radicalmente diferente de la banda de Möbius de la derecha. Ésta tiene solamente una cara y un borde.

gías completamente diferentes. Se pueden construir estructuras "rizadas" o "torcidas" similares en dimensiones mayores.

El ejemplo final con un problema topológico está relacionado con un rompecabezas que le presentaron al brillante matemático suizo del siglo XVIII Leonhard Euler. La ciudad de Königsberg se asentaba, por aquel entonces, alrededor de una isla situada en el lugar en que se bifurcaba el río Pregel. Los diferentes distritos de la ciudad estaban unidos por siete puentes, como se muestra en la figura 6. A los paseantes habituales les intrigaba la conjetura de que se podían atravesar todos los puentes en un paseo continuo sin cruzar dos veces ninguno de ellos. He aquí de nuevo un problema de topología, ya que el tamaño y la forma de los puentes es indiferente. Sólo importa la manera en que están conectados unos con otros. Euler demostró que la conjetura era falsa.

Puede parecer que la banda de Möbius o los puentes de Königsberg están muy lejos de la conexión cósmica, pero no es así. El es-

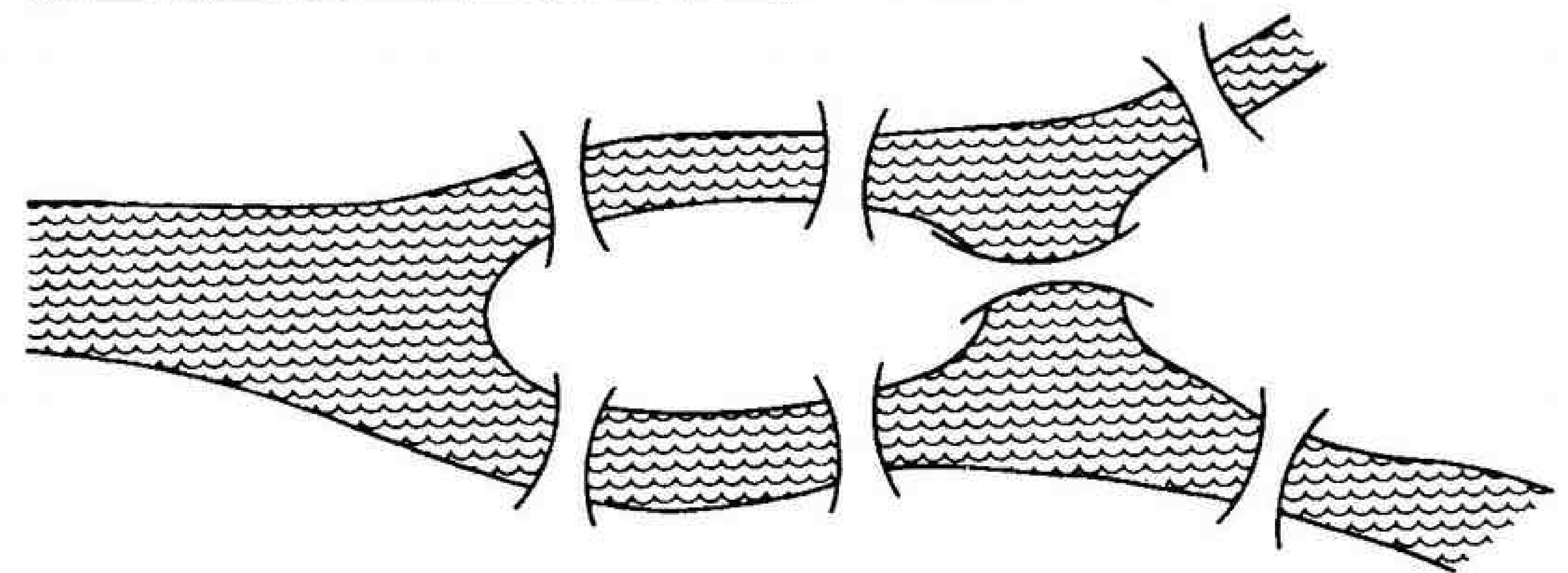


Fig. 6. *Los siete puentes de Königsberg.* ¿Es posible cruzarlos uno tras otro en un paseo continuo sin pasar dos veces por ninguno de ellos? Este problema clásico de topología fue resuelto por Euler en el siglo XVIII: es imposible.

pacio exterior es el campo experimental para la teoría del espacio curvado y del tiempo de Einstein. Es entre los inimaginables campos gravitatorios de los lejanos cuerpos astronómicos donde el espacio se tuerce y se curva, quizá incluso se desgarra y se junta en formas de Möbius, o con topologías más complicadas. Veremos, en los próximos capítulos, que la topología desempeña un papel central en la predicción de la estructura más extraña de la naturaleza: la singularidad desnuda.

Hemos examinado las ideas modernas de la astronomía y de la gravedad, y hemos visto cómo la ley del inverso del cuadrado de la distancia de Newton conduce a la posibilidad de que la gravedad supere todas las demás fuerzas, causando la implosión de una estrella sobre sí misma sin ninguna esperanza de impedirlo. Cuando esto ocurre, la gráfica de la figura 1 crece y crece sin límite. ¿Hacia dónde crece? Hacia el infinito. El infinito es lo que sigue al triunfo de la gravedad. Por tanto, ahora nos dedicaremos al estudio del infinito.

2. La medición del infinito

Para mucha gente el infinito implica algo inmenso e imposible de llegar a conocer. En el lenguaje popular se utiliza a menudo esta palabra para indicar de forma vaga "extremadamente grande" o "sin posibilidad de ser contado". Frecuentemente se cita el número de estrellas en el cielo o de granos de arena en la playa. Estos ejemplos no son, desde luego, realmente infinitos; sólo podemos observar a simple vista dos o tres mil estrellas en un instante dado. De hecho, en la vida diaria nunca tenemos ocasión de encontrarnos con el infinito.

En la ciencia, sin embargo, se encuentra muchas veces el infinito, en ocasiones de forma descorazonadora. Hace mucho tiempo que los matemáticos empezaron a intentar obtener una medida del infinito y a descubrir reglas que permitieran que el infinito engrosara las filas de otros objetos matemáticos como un concepto lógico bien conocido y disciplinado. Iban a tener muchas sorpresas. Los griegos clásicos sólo consiguieron limitados progresos, y no fue sino hasta el siglo XIX cuando se lograron progresos decisivos con el trabajo de grandes matemáticos como Georg Cantor y Karl Weierstrass.

Incluso en la ciencia el infinito es, para muchos efectos, solamente la idealización de una cantidad, que en realidad es tan grande que considerándola como estrictamente infinita se comete un error despreciable. Pero, de vez en cuando, la aparición del infinito en una teoría física indica algo mucho más espectacular: el fin de la misma teoría o bien de lo que ésta describe. Éste es el caso de las singularidades del espacio-tiempo. Gracias a ellas nos encontraremos cara a cara con el infinito, y parece que nos están revelando algo muy profundo: que hemos llegado al fin del Universo.

Para entender lo que realmente implican las singularidades, es necesario que primero nos familiaricemos con el infinito. En este capítulo explicaremos, en lenguaje asequible, algunos de los conceptos básicos. No probaremos de forma rigurosa los resultados que vamos a mencionar, dado que la comprensión de las demostraciones requeriría muchos años de estudio en matemáticas superiores. Es importante que nos demos cuenta de que el tema en cuestión no va a ser una teoría del mundo, sino que serán las matemáticas. Dados los axiones fundamentales, en los cuales se basan las matemáticas en último extremo, los resultados son desde luego correctos, sin ninguna posibilidad de duda, dado que todas las demostraciones se basan en la estricta lógica universalmente aceptada. Hacemos hincapié en este punto ya que los resultados son a menudo difíciles de creer; y sin embargo son ciertos. Veremos que medir el infinito puede ser una experiencia realmente singular.

El primer paso en el camino hacia el infinito es el descartar cualquier idea de lo "muy, muy grande". El infinito es mayor que cualquier número, por muy grande que éste sea –y no hay límite para los números–. Veremos que el infinito no solamente va más allá de cualquier límite sino que, en cierto sentido, es tan grande que es casi imposible hacerlo mayor. No podemos, obviamente, enumerar una colección infinita de cosas, de manera que a menudo se ponen unos puntos suspensivos como por ejemplo, el infinito de los números naturales 1, 2, 3... Los puntos suspensivos quieren decir que no hay un final para la secuencia ascendente.

El concepto de infinito ha sido una fuente de confusión e inquietud durante más de dos milenios. Los antiguos griegos hicieron intentos heroicos para comprenderlo, pero frecuentemente descubrían paradojas o llegaban a conclusiones absurdas al ser inducidos a error por la intuición del sentido común. El tema se complicó a menudo con controversias filosóficas y teológicas, e incluso contribuyó a la sentencia de muerte que recayó en 1600 sobre Giordano Bruno a manos de la Iglesia. Bruno había declarado su creencia en la infinidad de los mundos, en contra de la doctrina establecida de que sólo Dios era infinito.

Mucha gente encuentra por primera vez la idea de infinito al meditar acerca del Universo. ¿Se extiende éste sin fin? Si el espacio no es ilimitadamente extenso, ¿no significa esto que hay una barrera en alguna parte, en cuyo caso la barrera debe estar más allá, y debe haber algo al otro lado...? Otra pregunta, que a menudo hacen los niños, es del tipo "¿que sucedió antes?". Parece que cada suceso

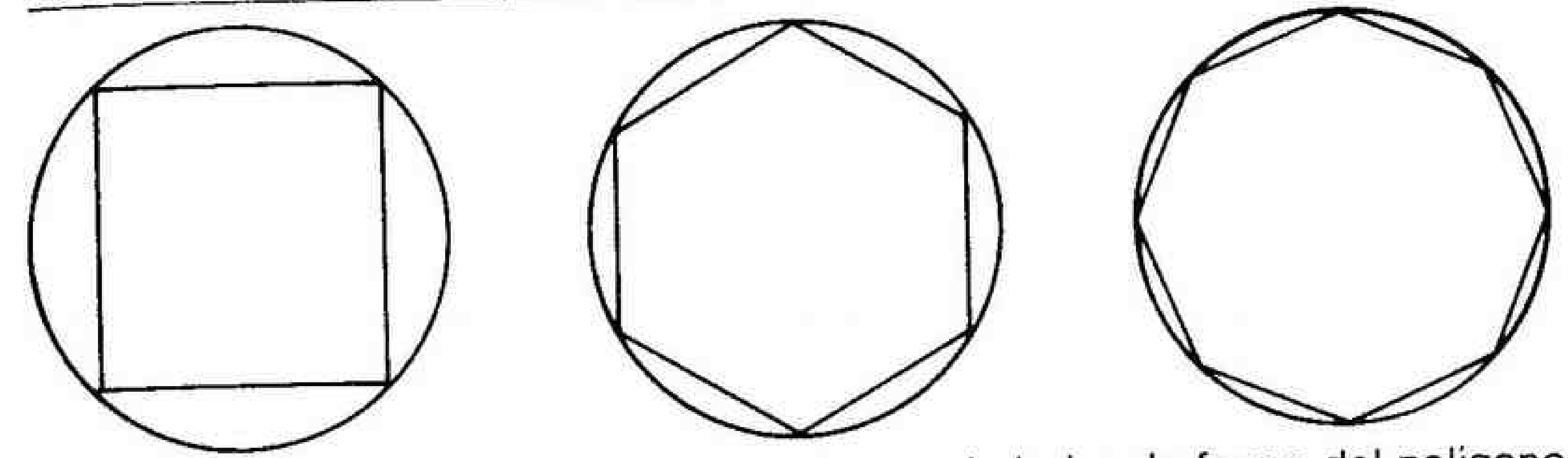


Fig. 7. A medida que aumentamos el número de lados, la forma del polígono inscrito se va aproximando a la de un círculo. En el límite de una figura de infinitos lados, el polígono y el círculo coinciden.

debe haber sido precedido por alguna causa, y que cada momento transcurrido debe venir después de otro momento anterior. Veremos que las respuestas a estas preguntas pueden ser asombrosamente distintas de las que son evidentes.

Los antiguos griegos hallaron el infinito no solamente al considerar si el espacio y el tiempo eran limitados o no. También en su matemática era a menudo necesario considerar cantidades que crecían sin límite. Se pensaba, por ejemplo, que el círculo era el resultado de un polígono en el cual el número de lados crecía indefinidamente. Hemos representado esta idea en la figura 7. El hexágono es una aproximación del círculo mejor que el cuadrado, mientras que el octágono lo es todavía mejor, y así sucesivamente.

Consideraciones como ésta llevaron al concepto de infinito como algo a lo que había que aproximarse, como el fin de una secuencia infinita de operaciones o aproximaciones sucesivas. Aristóteles hablaba de "infinito potencial", una idea que se ha repetido a lo largo de los siglos, como algo a lo que siempre nos aproximamos pero nunca alcanzamos. Al igual que Aristóteles, Immanuel Kant decía en el siglo XIX que "el límite absoluto (es decir, llegar al infinito) es imposible en la experiencia", mientras que nada menos que un matemático como el gran Karl Friedrich Gauss protestaba en 1831 contra el "uso del infinito como algo consumado". Incluso en este siglo, Hermann Weyl, un matemático y físico distinguido, no aprobaba la noción de infinito como algo completo. "Sigue", decía, "en un eterno estado de creación", pero sin llegar nunca a ser acabado.

El principio básico subyacente en el infinito potencial es el de que hay sistemas, como el de los números naturales, 1, 2, 3..., que

no tienen límite superior, de forma que nada impide que crezcan más y más. Pero, evidentemente, el infinito no es en sí un número ni nada que se le parezca. El infinito, para los partidarios de este punto de vista, es algo a lo que siempre nos acercamos, pero que nunca alcanzamos (una especie de ordenamiento sin un final).

El hecho de que el infinito sea algo que nunca se puede alcanzar, algo nunca "consumado", lleva a algunas paradojas embarazosas, como demostró por vez primera Zenón de Elea en el siglo V antes de Cristo. Consideremos, por ejemplo, el caso curioso de una flecha que viaja a 100 metros por segundo hacia un blanco que dista 200 metros. El sentido común nos dice que llegará al blanco al cabo de dos segundos. Pero antes de llegar la flecha deberá recorrer la mitad de su camino; en ello invierte 1 segundo. Una vez hecho esto, debe llegar al punto medio del trozo que le resta, lo que hace en 1/2 segundo. En ir al punto medio del segmento restante tarda 1/4 de segundo, y así sucesivamente. El número de incrementos adicionales (aunque sean de tamaño cada vez menor) no tiene límite. Entonces, ¿cómo puede la flecha llegar al blanco si el infinito es algo que nunca se puede alcanzar?

El sentimiento de incomodidad que crea esta paradoja impregnó a la matemática durante 2.000 años, y muestra lo resbaladizo que puede llegar a ser el concepto de infinito. Por mucho que la flecha se acerque al blanco, le quedan más pasos que dar que los que ya ha dado. El ejemplo también ilustra lo que a veces se considera sorprendente: que la suma de infinitos números puede, no obstante, dar un resultado finito. En este caso, el vuelo de dos segundos, está compuesto por la unión de todos los subincrementos:

$$1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + \ldots = 2$$

Muchas paradojas del infinito no se resolvieron, al menos para satisfacción de algunos matemáticos y filósofos, sino con el trabajo de Cantor y Weierstrass en el siglo XIX. El terreno lo preparó Bernhard Bolzano, un teólogo checo, matemático aficionado, que intentó poner unos fundamentos firmes y lógicos al concepto de un "infinito real", es decir, el infinito como una entidad completa y consumada, y no una simple meta a la que nos podemos aproximar pero nunca alcanzar. Por desgracia, sus trabajos le valieron el que en 1819 se le impidiera enseñar y publicar como profesor de filosofía de la religión en la Universidad de Praga. Su principal tratado, *Paradojas del infinito,* se publicó póstumamente en 1850. Al elevar el infinito de fin potencial a algo consumado, los matemáticos iban a ser capaces de contemplarlo con confianza, de acuerdo con reglas perfectamente entendidas, como cualquier otro objeto matemático.

Los pasos decisivos en esta dirección los dio Georg Cantor, una de las figuras más singulares en la historia de las matemáticas. Nacido en 1845 en San Petersburgo, Rusia, de padres daneses, vivió y estudió fundamentalmente en Alemania, sin causar nunca mucho impacto en el mundo académico. Ejerció todo su carrera profesional en la poco conocida Universidad de Halle. Sin embargo, sus logros fueron de una gran trascendencia. Se le atribuye la invención de la llamada teoría de conjuntos (que hoy en día se imparte de forma generalizada en la enseñanza básica), estableciendo también la teoría de los "cardinales transfinitos", que ha llegado a ser la base de todo el trabajo posterior sobre la noción de infinito.

La esencia del enfoque que Cantor hace del infinito había estado flotando en el ambiente de forma vaga durante muchos siglos. Por ejemplo, el siguiente hecho curioso fue puesto de relieve ya en el siglo XVII por Gottfried Leibniz. Imagínese una fila con todos los números naturales: 1, 2, 3, ... Se les da la orden "doblad vuestro valor" y todos se convierten en números pares 2, 4, 6... Es evidente que esta mutación no ha hecho variar la cantidad de números que hay, y por lo tanto debe haber tantos números pares como números naturales había al principio. ¡Pero el conjunto original de números 1, 2, 3, 4, 5, ... *contiene* a los números pares, y también a los impares! Evidentemente el conjunto de los números naturales es tan grande que todos sus miembros son tan numerosos como sólo una parte de ellos (véase figura 8).

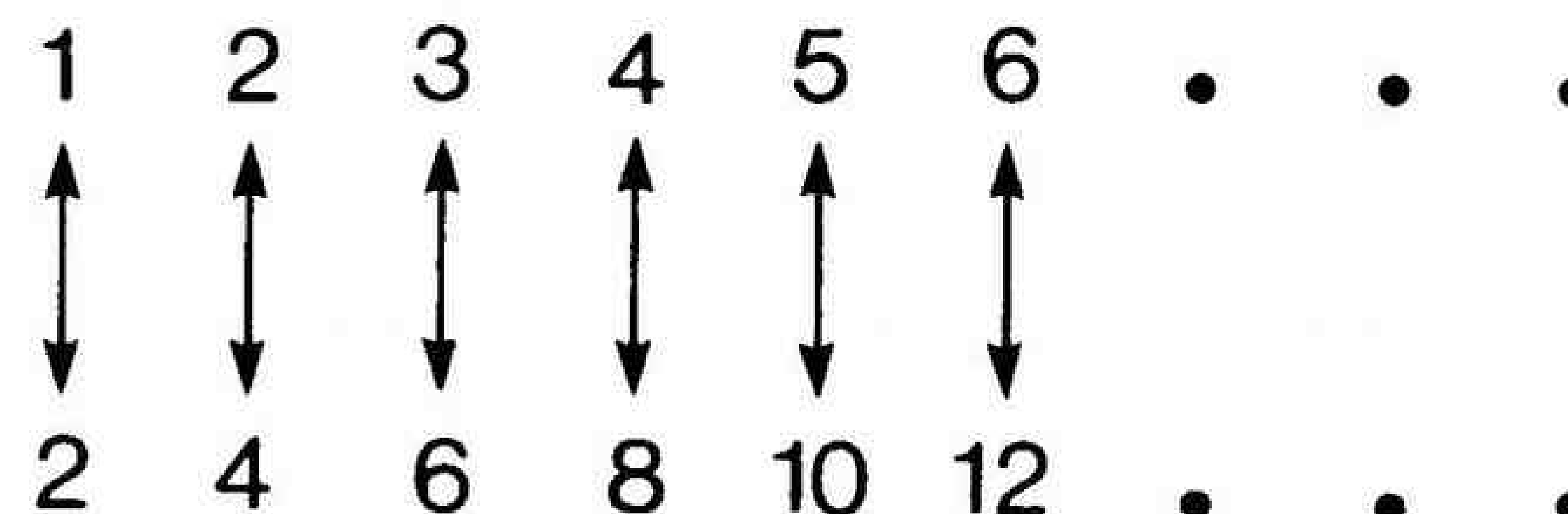


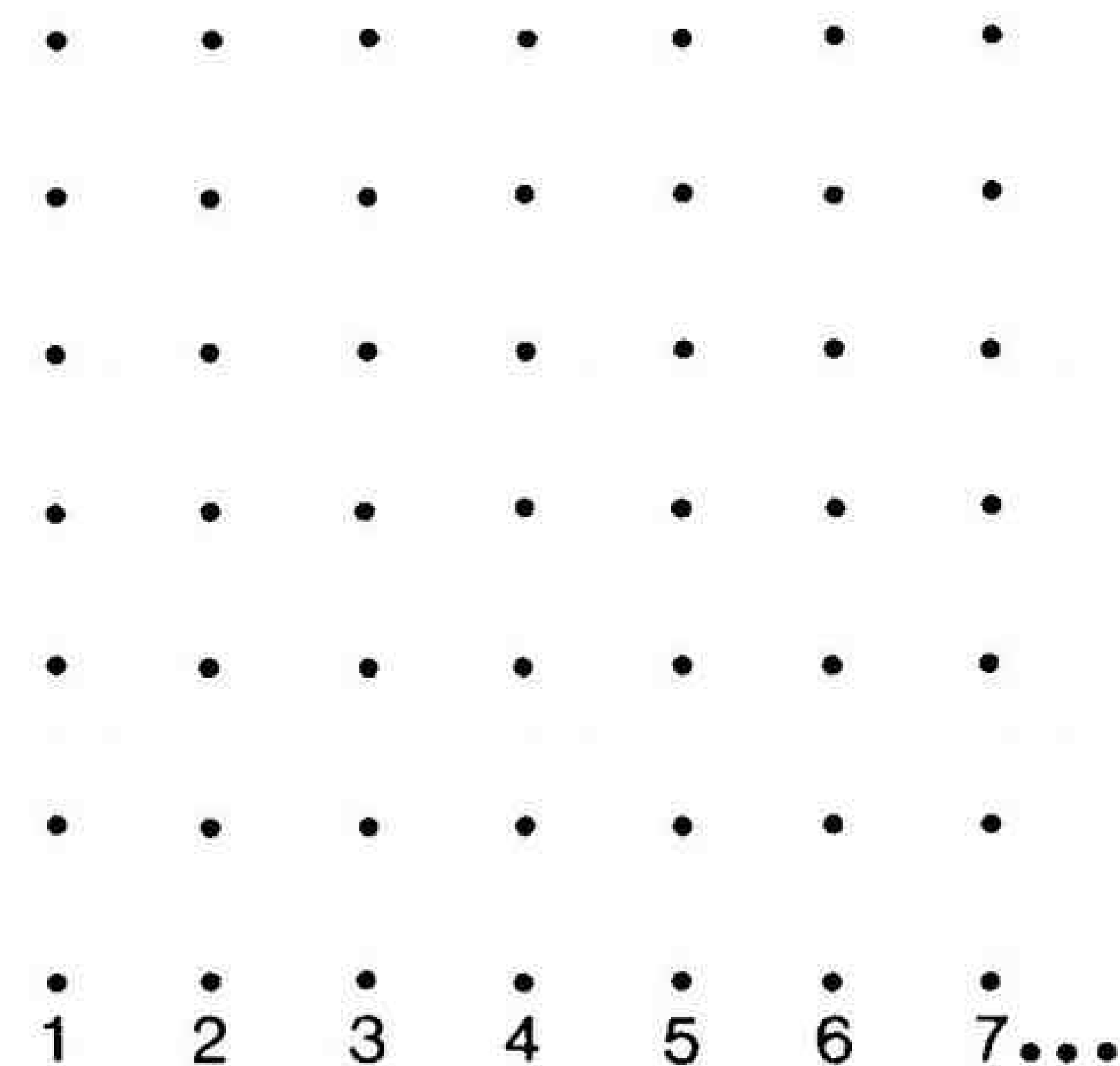
Fig. 8. El infinito es tan grande como una parte sola del mismo. Cada número entero de la (infinita) fila superior se puede emparejar con un número par de la infinita fila inferior. Ninguno se queda sin su compañero. Y sin embargo todos los números de la fila inferior están incluidos en la superior, que además contiene otros números.

La conclusión parece tan sorprendente porque intuitivamente se espera que sólo haya la mitad de números pares que el total de pares e impares. Pero cuando los conjuntos son infinitamente grandes la intuición nos lleva a error. La exactitud del resultado se demuestra de forma convincente imaginando que escribimos todos los números enteros cada uno en una cara de una tarjeta, formando todas ellas un fajo ilimitado. Por la otra cara de cada una de las tarjetas escribimos el número doble del que hemos escrito en el anverso (por ejemplo, la tarjeta 6 tiene un 12 en el reverso). El fajo de tarjetas pone de manifiesto la infinidad de los números enteros. Pero un observador situado en el lado contrario de las tarjetas vería en cambio una formación infinita de números pares 2, 4, 6, ... Como ambos observadores ven obviamente las mismas tarjetas, los números pares del reverso deben ser tantos como los pares e impares del anverso. Pero la misma formación de números pares se podría ver por la parte delantera eliminando las tarjetas impares, de manera que debemos concluir que eliminar una de cada dos tarjetas no hace que el número total de las mismas sea menor que antes. Y al revés, el conjunto infinito de todos los números pares no es mayor (es decir, no es más numeroso) por el hecho de que le añadamos todos los números impares.

Este resultado es desde luego asombroso. ¿Existe algún fallo lógico? Aparentemente no, pues si fuese cierto que hubiese *más* números naturales que números pares, entonces no podríamos emparejarlos a todos uno por uno con los pares. Habría números enteros (por ejemplo números impares) que quedarían sin el correspondiente número par con el cual emparejarse. Pero cada número en el anverso de la tarjeta, por grande que sea, tiene a su correspondiente número par en el reverso con el cual va emparejado, y por lo tanto a cada número entero, par o impar, se le puede acomodar en un esquema de emparejamiento uno a uno solamente con los números pares.

Si el infinito de números pares es tan numeroso como el de pares e impares juntos, parece, por así decirlo, como si doblando el infinito nos quedásemos con el mismo infinito. Aún más, se puede mostrar fácilmente que triplicar, cuadruplicar o multiplicar por cualquier otro número mayor el infinito tiene igualmente poco efecto. De hecho, incluso si multiplicamos infinito por infinito, éste todavía se resiste tenazmente a crecer. El cuadrado de infinito sólo es tan grande como el conjunto de los números naturales.

Se puede demostrar este resultado imaginando un conjunto infi-



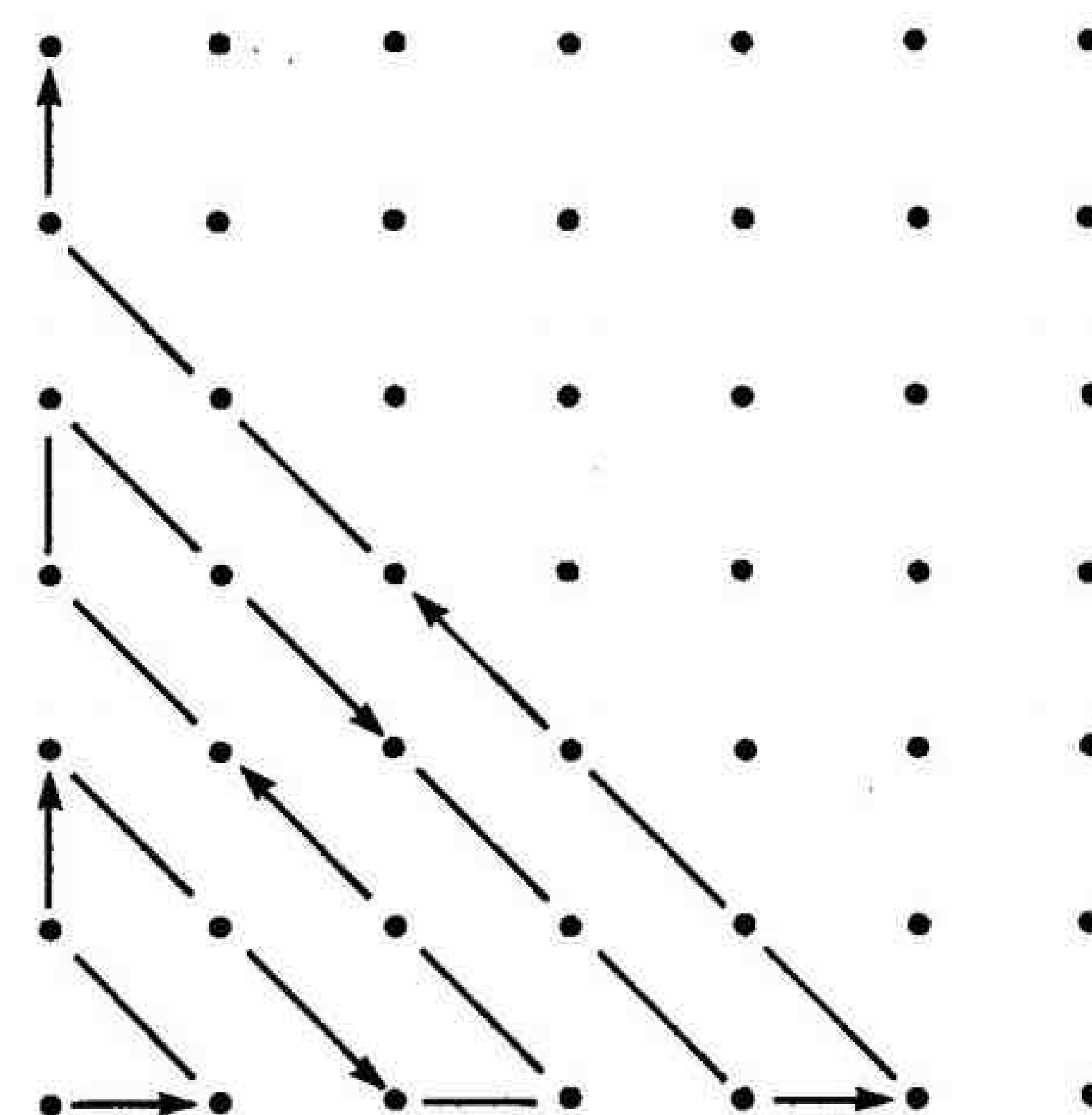


Fig. 9. *Infinito x infinito = infinito.* Puede verse que esta desconcertante ecuación es verdadera siguiendo el camino en zigzag por la infinita malla de camas. Podemos contar cada cama (1, 2, 3...) y emparejarlas una por una solamente con las camas de la fila inferior, por ejemplo. Para cada cama de la malla, hay un compañero que se encuentra en la fila inferior. Conclusión: no hay mayor número de camas en toda la malla infinitamente alta de las que hay en una sola de sus filas.

nito de camas dispuestas en hilera, otro conjunto infinito en otra hilera superior, luego un tercero y un cuarto y así sucesivamente, sin límite. Obtenemos una especie de enrejado o matriz de camas (véase figura 9 [i]) que contiene infinitas filas e infinitas columnas, un cuadrado infinito (que es, desde luego, el cuadrado de infinito). Ahora podemos ver fácilmente que no hay más camas en esta malla cuadrada sin fin, con sus columnas infinitamente largas, que las que hay en la simple fila de camas inferior (también sin fin). ¿Absurdo?

Para ver que ello es así sólo debemos echar una ojeada a la figura 9 (ii). Sigamos el camino de la flecha en zigzag. Obviamente ésta llegará a cualquier cama de la malla. A medida que pasamos por cada una de ellas vamos marcando una de las camas de la fila de abajo. Una por una las camas de la malla se van emparejando con las camas de la fila inferior. Ninguna cama de la malla quedará desparejada, de forma que, necesariamente, habrá tantas camas en toda la malla como en la fila inferior de la misma. ¡Qué resultado tan extraordinariamente opuesto a la intuición! La fila de camas inferior parece única y exclusivamente una minúscula (en realidad infinitesimal) fracción de toda la vasta malla que se extiende verticalmente hasta el infinito. Y sin embargo la lógica más estricta nos dice que la malla infinita no es mayor que una de las infinitas partes que la componen. Por otro lado, el resultado se puede extender a una malla cúbica o incluso más. De hecho, por muchas veces que multipliquemos el infinito por sí mismo, no conseguiremos de ninguna manera hacerlo crecer.

Si parece sorprendente que juntando todos los números pares con los impares no hagamos mayor el infinito, lo parecerá más todavía descubrir que el resultado sigue siendo igualmente cierto incluso si juntamos también todos los números fraccionarios. En el colegio aprendimos a escribir las fracciones como cocientes de números enteros, como por ejemplo 3/5, 91/217, 10514/69393. Al igual que los números no tienen límite ni se acaban nunca, lo mismo ocurre con las fracciones que formamos con ellos. Pero más aún, porque hay legiones enteras de infinidades de fracciones. Ello es así debido a que entre dos fracciones cualquiera, por muy próximos que sean sus valores, hay todavía infinitas fracciones. Por ejemplo, tomemos dos fracciones próximas como 1/250 y 1/251. Entre ellas dos hay otras fracciones como 2/501 y 4/1001. Entre estas dos se hallan otras y así sucesivamente, sin ningún límite.

También se puede entender esta propiedad en forma visual, estableciendo una correspondencia entre los números y los puntos de

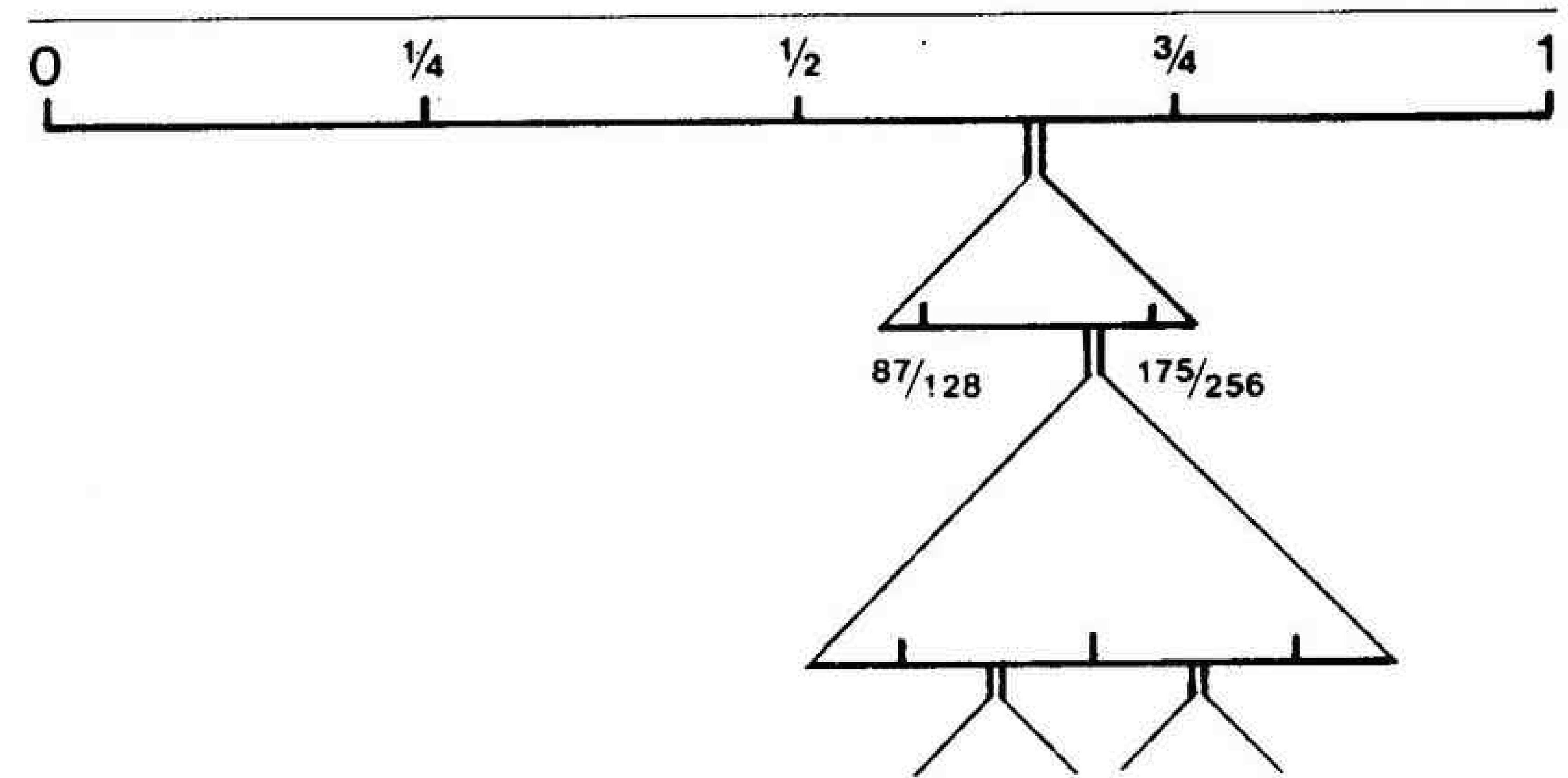


Fig. 10. Una línea continua puede subdividirse sin límite. Cada segmento puede ser aumentado de forma que muestre una secuencia infinita de subsegmentos en su interior, cada uno de los cuales está lleno de fracciones apiñadas con densidad infinita. Y sin embargo no hay más fracciones que números naturales 1, 2, 3...

una línea uno a uno, como cuando usamos una cinta métrica marcada con números. En la figura 10 hemos marcado sobre una línea los puntos 0, 1/4, 1/2, 3/4 y 1, representando la distancia del punto al extremo izquierdo de la línea. Supondremos aquí que un "punto" implica una posición sobre la línea sin tamaño o extensión de ningún tipo; algo que no tiene área, pensemos en un punto que se encoge hasta que sus bordes se desvanezcan. Naturalmente una entidad de este tipo no la podríamos representar en la figura 10, de forma que hemos utilizado una simple señal para indicar su posición aproximada.

Si imaginamos dos fracciones muy próximas, corresponderán a dos puntos situados muy cerca el uno del otro sobre la línea. Entre los puntos hay una banda o segmento de línea que tiene una longitud muy pequeña. Con una lupa, podemos aumentar este segmento y ver que podemos dividirlo en subsegmentos, dado que a lo largo del mismo hay infinitos puntos e infinitas fracciones. Podemos ir aumentando el segmento, viendo todas las sub-subdivisiones, sin límite alguno. Cada vez que elegimos dos fracciones distintas, por muy cerca que estén sus correspondientes puntos, podemos aumentar la escala y encontrar infinidad de otros puntos (fracciones) entre ellos. Esto es así en toda la línea infinitamente larga que se extiende hacia

la derecha pasando por todos los números enteros 1, 2, 3, ... Hay por lo tanto infinidad de infinidad de infinidad de fracciones que van apareciendo sin fin por todos los segmentos cada vez menores de la línea. Pero preguntémosle a un matemático si hay más fracciones que números enteros y responderá que no. A pesar de las infinitas reservas de fracciones que hay en el más pequeño de los intervalos que podamos tomar, dichas fracciones se pueden contar individualmente y se pueden numerar con números naturales (es decir, aparearlas con ellos una a una). La prueba de ello se desprende del ejemplo de la malla que hemos mencionado antes, ya que los dos números que componen una fracción se pueden asociar con una cama de la malla de forma muy simple. Por ejemplo, la fracción 7/43 se puede asociar con la cama situada en la séptima fila de la columna 43. Por lo tanto hay tantas fracciones como números naturales. En realidad, hay tantos números naturales *y* fracciones juntos como números naturales solamente; añadir todas las fracciones no hace mayor la cantidad de números que hay.

En este punto puede parecer que el infinito de los números naturales es tan grande que no se le puede incrementar, pero esto es falso. En un famoso teorema, Georg Cantor demostró lo aparentemente imposible: que hay infinitos conjuntos tan grandes que no podemos contar sus elementos, incluso con ayuda de los infinitos números naturales de los que disponemos. Por lo tanto este infinito debe ser mayor que el de todos los números naturales y todos los números fraccionarios (los cuales podemos contar como hemos visto) juntos.

Este resultado puede ser difícil de aceptar, ya que mucha gente cree que los números naturales y los fraccionarios son los únicos que existen. ¿Cómo puede haber más cantidad de algo que de números? Sin embargo, se sabe desde el tiempo de Pitágoras que existen números que no se pueden expresar ni de forma entera ni como fracción, de hecho existen una infinidad de ellos. Antes de discutir la demostración de Cantor, echemos una mirada a este misterio de los números que faltan.

Fijémonos de nuevo en la figura 10. Cada fracción o número entero corresponde a un punto en la línea. ¿Pero es cierto el inverso? ¿Podemos asociar a cada punto una fracción? Los antiguos griegos así lo habían creído. Después de todo, disponemos de infinitos ejércitos de fracciones, apiñadas de forma infinitamente densa. Pero el infinito es un concepto resbaladizo, por consiguiente debemos ir con cuidado. ¿Habrá puntos en la línea que de alguna forma

se "esconden" entre las fracciones, a pesar de que éstas estén infinitamente cerca de sus vecinas? Si existieran, en algún extraño sentido, "huecos" entre las fracciones, sabemos que estos huecos deberían tener un tamaño nulo. Pero un punto tiene también tamaño nulo, de forma que en realidad podemos imaginar que existen puntos que hayan sido pasados por alto entre las fracciones.

Un colega de Pitágoras descubrió una sencilla prueba de que existen realmente estos números extra "en los huecos". Tomemos un cuadrado, dijo, cuyo lado mida una unidad (un metro, si se prefiere). Entonces la longitud de la diagonal (que se sabe por medidas que es en la práctica alrededor de $1\,\frac{207}{500}$) no se puede expresar como fracción exacta. Dicho de otra forma, el punto que en nuestra línea de la figura 10 corresponde a la longitud de la diagonal del cuadrado no tiene ninguna fracción asociada. Está, por increíble que parezca, en un "hueco" infinitesimal entre las fracciones que se apiñan de forma infinitamente densa alrededor de $1\,\frac{207}{500}$.

La demostración de esta notable afirmación constituye siempre un motivo de atracción para los jóvenes estudiantes. La longitud de la mencionada diagonal se puede expresar como la raíz cuadrada de 2 (escrito $\sqrt{2}$) dado que se sabía por el teorema de Pitágoras que cuando este misterioso número se multiplica por sí mismo daba 2 (es decir $\sqrt{2} \times \sqrt{2} = 2$). La prueba consiste en demostrar que $\sqrt{2}$ no se puede expresar en la conocida forma fraccionaria m/n, donde m y n pueden ser números enteros cualesquiera sin ningún divisor común (excepto el 1). Se procede por contradicción; es decir, suponemos que $\sqrt{2 = m}/n$ y después demostramos que no hay ningún n ni m que cumplan esto.

Si $\sqrt{2} = n/m$ entonces elevando al cuadrado ambos lados de la ecuación da $2 = n^2/m^2$, es decir $n^2 = 2m^2$. Por lo tanto es evidente que n^2 es un número par, dado que es doble del número entero m^2. Pero si n^2 es par, también ha de serlo n (un número impar elevado al cuadrado da otro número impar). Aquí es donde empezamos a ver que está pasando algo peculiar, dado que todos los números pares son el doble de otro número entero, y por lo tanto podemos escribir n como $2p$, donde p es algún otro número entero. Haciendo esto, vemos $n^2 = 4p^2$, y en consecuencia nuestra ecuación $n^2 = 2m^2$ es ahora $4p^2 = 2m^2$, o $m^2 = 2p^2$. Pero ahora podemos razonar de nuevo que m^2 (y por tanto m) ha de ser un número par, por ser el doble del número entero p^2. La conclusión de este razonamiento es que n y m son pares, en evidente contradicción con el hecho de que no tiene ningún divisor en común: ambos son divisibles por 2.

Los griegos hallaron otros ejemplos de números de "hueco". Uno de estos, llamado π, es el cociente entre la longitud de la circunferencia y el diámetro del círculo. La sospecha en estos números no fraccionarios les valió el apelativo de "irracionales", siendo el resto, los genuinos, los números enteros y fraccionarios descritos como "racionales". Con el fin de simbolizar todo el gran aparato que forman los números racionales e irracionales se debe utilizar el sistema decimal. Si bien se puede expresar toda fracción como un número decimal, el inverso no es cierto. Algunas fracciones, como 1/4, tienen una forma decimal finita (0,25), mientras que otras, como 1/3, necesitan de una forma decimal infinita (0,3333...). Todos los números irracionales, como π, precisan de infinitos decimales.

El gran hallazgo de Cantor fue que el conjunto de todos los decimales (es decir, los racionales y los irracionales) constituyen un infinito mayor que el conjunto de las fracciones (es decir, solamente los números racionales). Estas cuestiones pueden parecer sutilezas matemáticas, pero tienen un alcance muy profundo. Detrás del trabajo de Cantor y de tantos otros para llegar a entender al infinito como concepto real y concreto hay siglos de intentos para alcanzar una comprensión del tiempo, del espacio, del orden, de los números y de la topología. Algunas de las mentes más preclaras en la historia del género humano han fracasado en el tema del infinito. Pocas ideas ha habido que hayan desafiado tanto al intelecto del hombre.

La esencia de la demostración de Cantor es que, si los decimales fueran solamente tan numerosos como las fracciones, que a su vez lo son tanto como los números naturales (como ya hemos visto), entonces sería posible contar o marcar a todos los decimales uno por uno con los números enteros, 1, 2, 3... Esto significa que si escribimos todos los decimales en una columna infinita, uno debajo del otro, podríamos irlos marcando con 1, 2, 3... (véase figura 11). El orden concreto no importa, y la figura 11 muestra uno cualquiera elegido al azar. Cantor indicó cómo se puede construir otro decimal que no estará presente en ningún lugar de la columna, contradiciendo así el supuesto de que se puede ir numerando todos los decimales uno por uno.

Para llevar a cabo la construcción de Cantor, simplemente vamos bajando por la diagonal y sacando los dígitos que hay en ella, volviéndolos a escribir en fila así: 21479058... Después cambiamos este conjunto restando uno en cada posición (o sumando uno si hay un cero): 10368147... Evidentemente, el decimal 0,10368147 no puede estar *en ningún lugar* de nuestra columna original, ya que difiere de cualquiera de los que haya en al menos uno de los lugares decimales, debido a la modificación a que lo hemos sometido. La conclusión es asombrosa. Hay infinitos números racionales e infinitos decimales, pero este último infinito es *mayor* que el primero.

Provistos de este hecho sorprendente, podemos ver ahora una propiedad importante de la representación de los números con puntos en una línea. Consideremos la fila de puntos de la figura 12.

0.**2**8307149...
0.9**1**521932...
0.88**4**75628...
0.310**7**8454...
0.2913**9**266...
0.76842**0**31...
0.419866**5**3...
0.6002793**8**...

Fig. 11. Los decimales entre 0 y 1 no se pueden contar, incluso con los infinitos números naturales 1, 2, 3. Si a cada dígito en negrita se le cambia en una unidad el decimal resultante en la diagonal no puede estar en la lista original, por muchos decimales que haya en ella. Conclusión: hay más números decimales entre 0 y 1 que todas las fracciones.

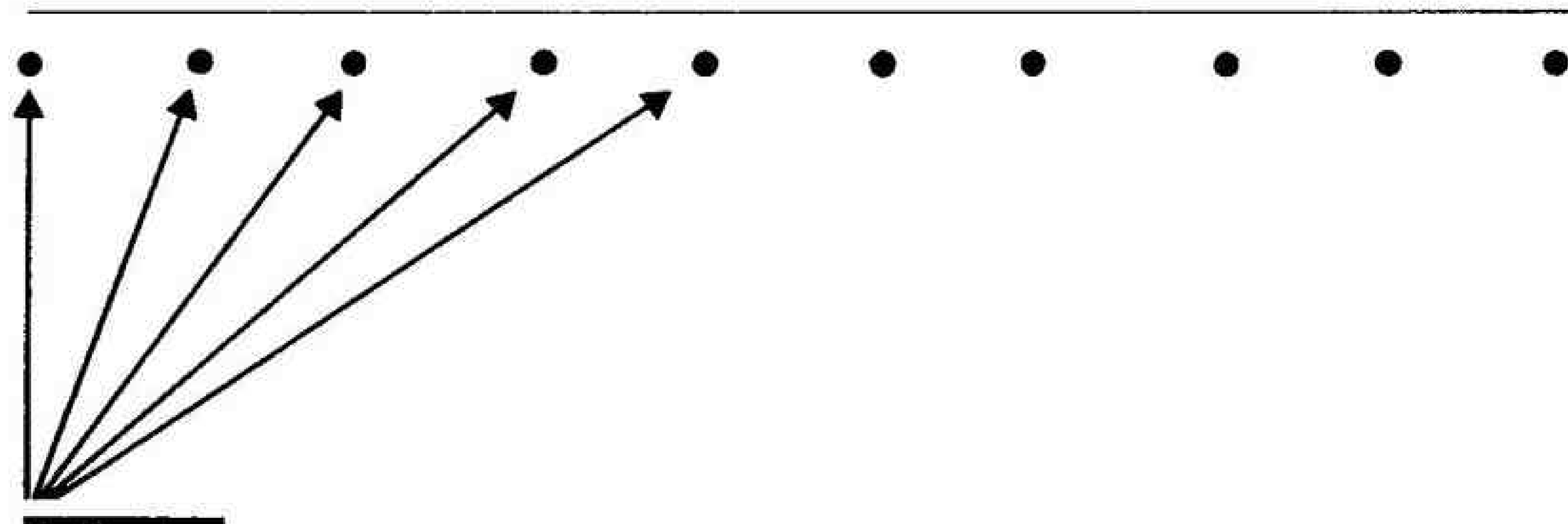


Fig. 12. *Dos órdenes de infinito.* Imaginemos que intentamos desmembrar una línea continua tomando puntos de la línea, uno por uno, empezando por la izquierda y disponiéndolos individualmente en una fila como se muestra. Incluso tras sacar infinitos puntos de la línea no ha disminuido su tamaño en lo más mínimo, ya que los puntos aislados, cada uno de longitud cero, nunca pueden llegar a sumar ninguna longitud medible. De forma similar, infinitos puntos aislados que se apiñen ilimitadamente, nunca pueden llegar a llenar una línea continua, por muy corta que ésta sea.

Esta fila se extiende en forma infinita hacia la derecha. Imaginemos que la fila se contrae hacia la izquierda, cada vez más deprisa, hasta que todos los huecos entre los puntos desaparecen. Tenemos ahora lo que podría parecer una línea "sólida". Pero no puede ser así. Los puntos se pueden rotular con enteros, de forma que su infinito es de una clase "menor". Incluso aunque los apiñáramos de manera infinitamente densa, no tendríamos suficientes como para llenar una línea *continua*. Para ello necesitamos un infinito "mayor": el infinito de todos los decimales.

Una manera de describir la diferencia entre el infinito de puntos apretados y la línea continua es en términos de longitud. Cada punto, por definición, tiene longitud cero. Por lo tanto, cualquier número de ellos, incluso infinito, tendrá todavía longitud cero. Necesitamos mucho más que una fila infinita de puntos para llenar una línea continua. La línea tiene claramente una cierta longitud.

Estas dos órdenes de infinito se distinguen a veces llamando al primero discreto, o contable, significando esto, para decirlo de alguna manera, que los elementos o puntos no están conectados unos con otros y se pueden distinguir de uno en uno. El otro infinito –el infinito de la línea– se llama continuo. Esta distinción es muy importante al considerar la naturaleza del espacio y del tiempo.

No debería sorprendernos el descubrir ahora que no podemos hacer un infinito continuo mayor de lo que es por medios directos: por ejemplo, alargando la línea. Una línea de un centímetro tiene el mismo número de puntos que una línea de dos centímetros. Se puede ver fácilmente que es así echando una ojeada a la figura 13. La línea oblicua es dos veces más larga que la vertical, pero cada

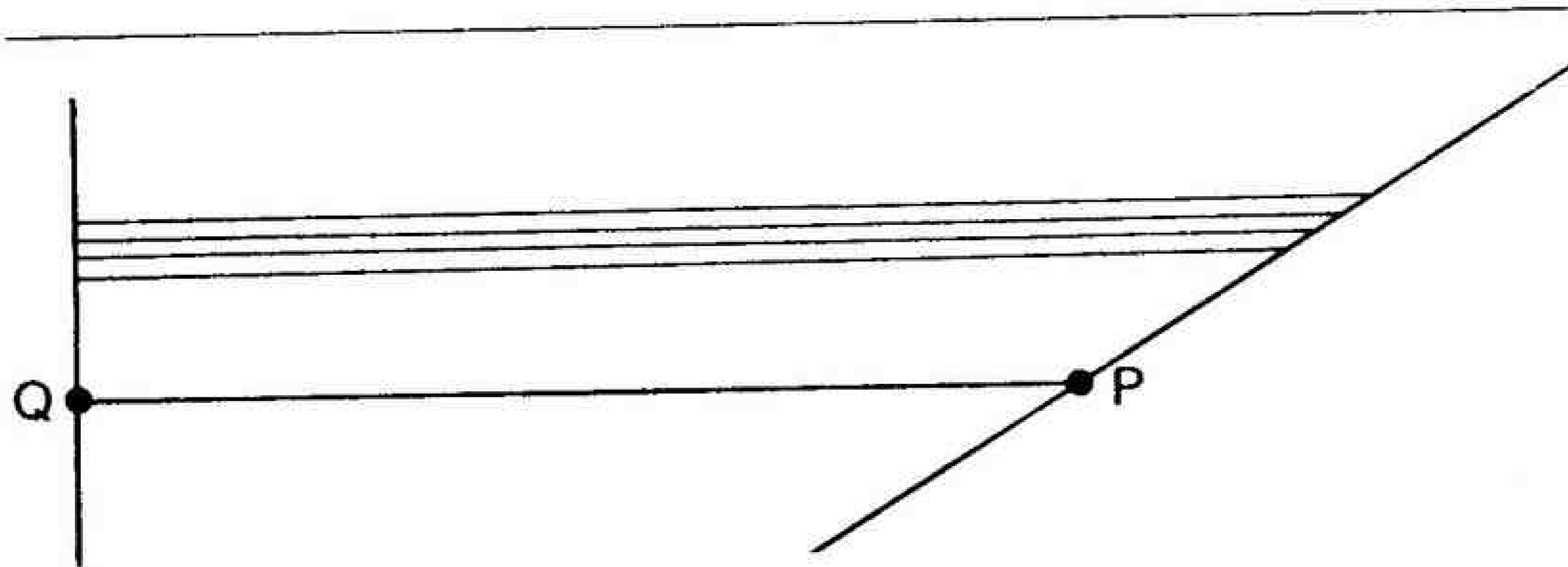


Fig. 13. Las dos líneas, aunque de longitud diferente, tienen el mismo número de puntos, ya que cada punto P de la línea oblicua puede emparejarse de forma única con un punto Q de la línea vertical.

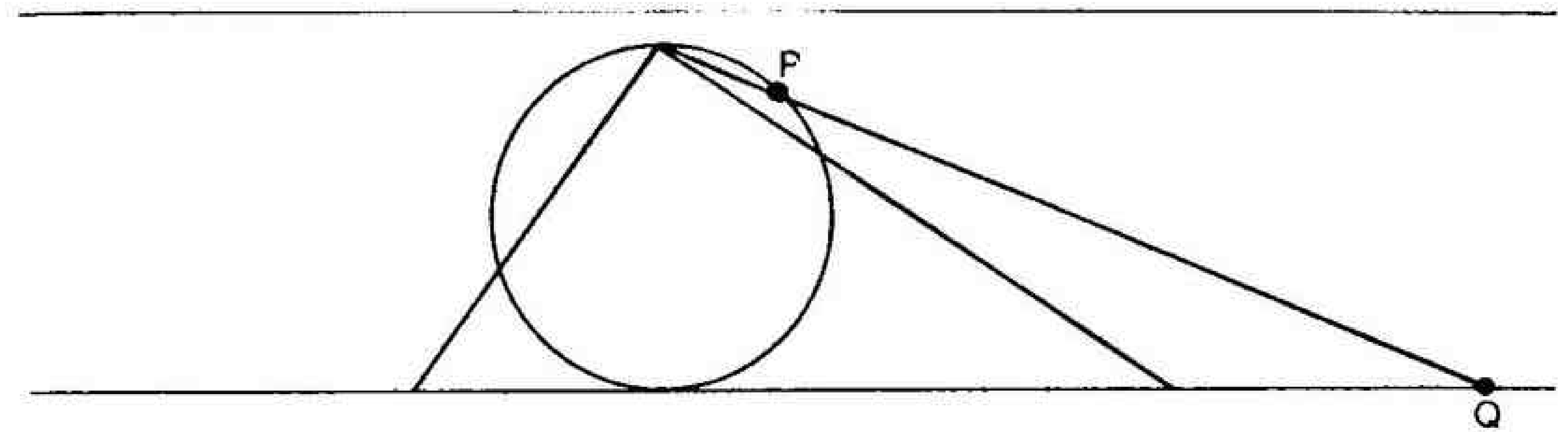


Fig. 14. El círculo contiene tantos puntos como la línea (que suponemos que se extiende por ambos lados hasta el infinito). Cada punto del círculo, como el P, se puede emparejar uno a uno con un punto Q de la línea. (El punto superior del círculo requiere una consideración especial.)

punto de la misma se puede asociar a uno y solo un punto de la línea vertical dibujando líneas paralelas horizontales entre ellas. De entrada parece que debe haber algunos puntos de los que "nos olvidemos" en la línea oblicua, pero, desde luego, ése no es el caso. Dado que las líneas paralelas no pueden nunca cortarse, cada punto de la línea oblicua debe tener su propio compañero (punto) en la línea vertical.

De la observación de que hay igual número de puntos en una línea corta que en una larga, al hecho de que no hay mayor número de puntos en una línea *infinitamente* larga sólo media un pequeño paso. En el dibujo de la figura 14, cada punto del círculo se une con un punto de la línea recta, que debemos imaginar que se extiende sin fin. Y todavía más: de igual forma que podemos "elevar al cuadrado" un infinito discreto y no tener mayor número de puntos (véase figura 9), igualmente podemos "elevar al cuadrado" una línea para obtener una superficie o plano, infinitamente extenso, sin que nuestro infinito continuo se haga mayor. Podemos incluso "elevar al cubo" nuestra línea y considerar el volumen entero de espacio infinito. ¡Este Universo sin fin no tiene más puntos que la pequeña línea de la figura 12!

Si este resultado puede parecer desconcertante, peor es lo que sigue. Podríamos preguntarnos lo corta que puede ser nuestra "pequeña línea", conteniendo todavía tantos puntos como el espacio infinito. Dado que una línea corta nos sirve para este propósito tanto como una larga, podemos hacerla tan corta como queramos. De hecho, podemos hacerla *sin ninguna longitud* y tener todavía puntos suficientes para emparejarlos, uno por uno, con todos los puntos del espacio infinito.

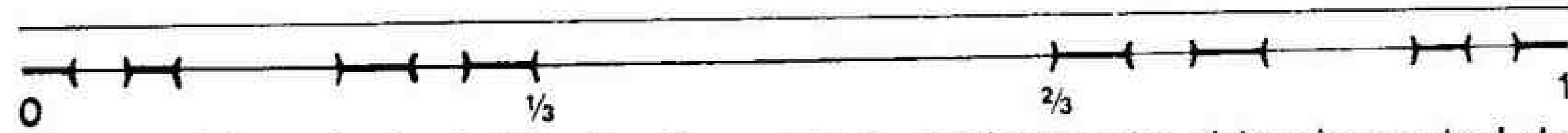


Fig. 15. *El conjunto de Cantor.* Borrando sucesivamente el tercio central de cada segmento de línea, nos acercamos a una colección de fragmentos de línea de longitud total cero, a pesar de que sus puntos son tan numerosos como todo el Universo. En la figura se muestra la tercera fase de la secuencia.

Esta desconcertante proposición también fue demostrada por Cantor. Su esquema se muestra en la figura 15. Tomemos una línea de longitud unidad. Cortemos de ella el tercio del centro. De los dos trozos restantes volvemos a cortar el tercio central, después el tercio central de los trozos restantes y así sucesivamente. En cada paso, la longitud total de la línea (sumando todos los trozos) vale los dos tercios de la longitud que tenía antes. Siguiendo este proceso, la longitud total disminuye paso a paso hasta que nos quedamos con un espacio casi totalmente vacío. Pero en ningún punto podemos saltar de un infinito continuo a nada inferior. Cantor demostró que incluso cuando se ha hecho un número infinito de cortes, y la línea ha llegado a una longitud total cero, *todavía* tiene más puntos que la fila discreta de puntos (figura 12). El hecho de que la longitud de una fila infinita de puntos discretos sea cero, no implica que contenga el mismo número de puntos. La extraordinaria conclusión es que una línea de longitud cero puede contener tantos puntos como todo el Universo.

Es muy útil entender la relación que existe entre el infinito y su opuesto, el también, en alguna manera, misterioso cero. En cierto sentido, cero es infinitamente pequeño, el límite opuesto a infinito. Existen problemas si se multiplica cero por infinito y tales operaciones deben ser realizadas cuidadosamente.

El infinito se puede generar a partir de cero, y viceversa, de forma muy fácil. Cuando escribimos un medio como $1/2$, queremos decir "1 dividido por 2". De forma similar un cuarto es uno dividido por cuatro, $1/4$, y así sucesivamente. Cuanto mayor es el número inferior, menor es la fracción que obtenemos. Por pequeño que sea un número y que elijamos (es decir por mucho que nos acerquemos a cero), siempre podemos encontrar otro número, x, que es suficientemente grande como para que $1/x$ sea menor que y. En el límite x se hace infinitamente grande, $1/x$ se aproxima a cero. Por lo tanto, y por así decirlo, uno dividido por infinito es igual a cero. De la misma forma, uno dividido por cero es igual a infinito, ya que

si en $1/x$ hacemos x cada vez menor, hasta que se aproxima a cero, $1/x$ se hace cada vez mayor sin límite. (Recordemos que $1/{}^{1}/_{2} = 2$, $1/{}^{1}/_{4} = 4$, etc.)

Ocurren otros muchos hechos singulares con el infinito, pero no podemos entretenernos en ellos aquí. La medición del infinito puede ser catalogada como una de las mayores empresas del intelecto humano, comparable con las más majestuosas formas de arte o de música. Las matemáticas, "eternas y perfectas" en palabras de Lord Bertrand Russell, pueden ser utilizadas para construir estructuras más bellas y agradables que cualquier escultura. Pero el edificio del infinito de Cantor –"un paraíso del que nadie nos sacará", como llegó a decir su contemporáneo David Hilbert– se cobró su tributo. La lucha con el infinito demostró ser una experiencia tan turbadora que cuando el respetado matemático Leopold Kronecker definió el trabajo de Cantor sobre la teoría de conjuntos como "una locura matemática", parece ser que dio en el blanco. Cantor sufrió varios ataques nerviosos, y finalmente murió en un hospital psiquiátrico en 1918.

Ya hemos dicho suficiente para mostrar que las propiedades de los conjuntos o colecciones infinitas son a menudo contrarias a la intuición, y que el razonar de acuerdo con el sentido común puede llevar a absurdos. Sin embargo, al descubrir estas elaboradas propiedades, los matemáticos pueden usar el infinito sin miedo, siempre y cuando se atengan estrictamente a las reglas, por muy extrañas que éstas puedan parecer. La pregunta es, ¿importa realmente? ¿Es importante el infinito o estas observaciones son sólo un ejemplo de rebuscadas sutilezas con que los matemáticos se divierten? La respuesta es que el infinito aparece repetidamente en las teorías del mundo físico, y muy especialmente en conexión con las singularidades del espacio-tiempo. Pero antes de abordar este tema, será muy útil examinar algunos casos fácilmente visualizables en que el infinito se ha introducido en la física, para desconcierto de los investigadores.

En la vida diaria pensamos en la materia como un elemento continuo, pero si la dividimos y subdividimos, llegamos finalmente a la conclusión de que, en realidad, se compone de átomos, entidades aparentemente discretas. Se supuso durante mucho tiempo que los átomos eran como esferas sólidas e indestructibles de las que se formaban todas las cosas. Se sabe ahora que los propios átomos son objetos compuestos, que contienen electrones en órbita alrededor de un núcleo consistente en una colección de protones y neutrones.

En los últimos años, los físicos han empezado a considerar que los protones y los neutrones –y otras partículas subatómicas que se obtienen en las colisiones de alta energía– también son compuestos, y consisten en dos o tres partículas llamadas quarks.

Tanto los quarks como los electrones, así como otras partículas semejantes a éstos, son probablemente de verdad elementales, sin partes constituyentes. ¿Cómo podemos visualizarlas? Para ser indestructibles podrían ser esferas infinitamente duras, impenetrables. Pero un modelo como éste presenta graves dificultades. Supongamos que un quark esférico chocara con un electrón, como dos bolas de billar que colisionan. Cuando el quark retrocede, debe moverse como un todo, sin distorsión, ya que si es infinitamnete duro no se le puede aplastar. Esto quiere decir que todas las partes del quark se han de mover simultáneamente. Para que esto ocurra la sacudida producida por el impacto sobre la superficie debe transmitirse instantáneamente a todas las partes de la esfera. Este supuesto, de hecho, queda descartado en la práctica por la teoría de la relatividad, que prohíbe, como veremos en el próximo capítulo, que ninguna influencia, incluyendo las sacudidas, viaje más rápido que la luz. Por consiguiente la "espalda" del quark no puede comenzar a moverse al menos hasta que haya pasado suficiente tiempo como para que la sacudida pueda viajar a la velocidad de la luz (o más despacio) por su interior. Se deduce de esto que para moverse la esfera debe achatarse un poco. Pero si la esfera se puede aplastar no puede ser elemental e indestructible, ya que en principio podríamos, disponiendo de suficiente energía, hacerla pedazos. Además, una esfera elástica requiere de fuerzas internas que produzcan la elasticidad, y se ha demostrado que es prácticamente imposible elaborar modelos de tales fuerzas.

Otra posibilidad es suponer que los quarks y los electrones son indestructibles porque no tienen partes internas. Es decir, son objetos puntuales, que no ocupan ningún volumen, al igual que los puntos de la figura 12. Esta idea también produce dificultades que vamos a examinar ahora en algún detalle.

Tanto los quarks como los electrones tienen carga eléctrica. Las leyes de la electricidad indican que todas las cargas eléctricas repelen a otras cargas del mismo signo con una fuerza en ley del inverso del cuadrado de la distancia –exactamente igual que la ley de Newton de la gravedad, pero con una repulsión en lugar de una atracción. Supongamos, por el momento, que podemos considerar al quark como una esfera finita con carga eléctrica repartida uniformemente en ella. Cada parte de la esfera repelerá eléctricamente a todas las otras, dado que todas tienen carga similar. Supongamos ahora que contraemos un poco la esfera. La fuerza eléctrica, que trata de hacer reventar la esfera, crece terriblemente, dado que la carga eléctrica se apiña aún más densamente. Por lo tanto, para comprimir la esfera hemos de hacer un gran esfuerzo contra esta repulsión eléctrica interior. El esfuerzo realizado queda acumulado en la esfera en forma de energía eléctrica, y podría recuperarse permitiendo que la esfera se expandiera de nuevo, utilizando su fuerza para mover un motor (en principio).

Es evidente que a medida que comprimimos la esfera, gastamos más y más energía, y la esfera va acumulando esta energía en aumento. Mientras tanto la fuerza según la ley del inverso del cuadrado de la distancia va tomando importancia, dado que un simple cálculo nos muestra que la energía de la esfera es proporcional a $1/$(radio de la esfera), es decir $1/x$, donde x es el radio de la esfera. Este símbolo ya nos es familiar, y según la discusión que hemos realizado ante se puede ver que el radio va disminuyendo hacia cero, es decir, la partícula se hace puntual, y por tanto la energía se hace infinita.

¿Qué quiere decir que la partícula tiene energía infinita? De acuerdo con la teoría de la relatividad, masa y energía son equivalentes, o lo que es lo mismo, la energía tiene masa. Por consiguiente, si una partícula puntual cargada tiene energía infinita, también debe tener masa infinita y ser infinitamente pesada. Este resultado absurdo –que todas las partículas subatómicas deban ser infinitamente pesadas– es un síntoma de la enfermedad que aqueja a todas nuestras teorías de la materia subatómica de una u otra manera.

A este nivel de descripción, la aparición del infinito, aunque molesta, no es desastrosa. El electrón no tan sólo no es infinitamente masivo, sino que es muy poco pesado, unos 10^{-27} g. Para poder seguir calculando con la teoría de las partículas eléctricamente cargadas sólo es necesario que ignoremos el infinito y lo reemplacemos por el valor medible y finito que se obtiene en la práctica en el laboratorio. Esta medida solamente puede ser provisional, ya que el simple hecho de que apenas aparezcan cantidades infinitas nos indica que debe haber algo incorrecto con la clase de estructuras simples, es decir, la partícula puntual, que estamos considerando. Así, el infinito actúa como una especie de señal de alarma, diciéndonos que hay algo muy equivocado.

En los años 20 se descubrió que los electrones, y otras partícu-

las subatómicas, son en realidad objetos más complejos que simples bolas a escala minúscula. Por ejemplo, en muchos aspectos es más exacto considerarlas como ondas. Se necesitaba una nueva teoría que diera cabida a estas singulares propiedades, una teoría que hoy se conoce con el nombre de mecánica cuántica. Una descripción completa de la mecánica cuántica está más allá de los fines de este libro, pero se trata en profundidad en mi libro *Otros mundos.**

Un punto fundamental de la mecánica cuántica es el llamado principio de incertidumbre de Heisenberg, que permite la suspensión temporal de la ley de conservación de la energía. Ésta, hasta ahora ley universal, es la expresión del hecho de que aunque la energía se puede convertir fácilmente de una forma en otra (por ejemplo, de calor en electricidad, de electricidad en movimiento o en luz, etc.) la cantidad total de energía permanece siempre invariable. Si esto no fuera así podríamos obtener algo a partir de nada.

Precisamente esto es lo que ocurre en el interior de los átomos. La energía puede aparecer de pronto de la nada, siempre y cuando desaparezca enseguida. Podemos imaginar que la energía se coge "prestada" de un banco ilimitado, pero sujeta a la regla de ser devuelta pronto. La rapidez de la devolución depende de la cantidad prestada. A más energía, más corto es el préstamo, proporcionalmente. Por ejemplo, la energía necesaria para arrojar una pelota de tenis a diez metros solamente se puede tomar prestada durante una billonésima de una billonésima de una billonésima de segundo, lo que no le permite llegar muy lejos. Es por ello por lo que el principio de incertidumbre de Heisenberg no se nota en la vida diaria. Pero en el interior del átomo el panorama cambia. Allí, un poco de energía da para mucho. Un electrón puede tomar prestada suficiente energía como para escapar del átomo y volver, inestabilidad que lleva directamente a efectos medibles.

Cuando los electrones se mueven, tienden a esparcir parte de su energía en forma de fotones (paquetes de luz tipo partícula). En realidad la luz se crea normalmente a partir de violentas perturbaciones eléctricas que se producen entre los átomos. La energía que transportan los fotones han de proporcionarla los electrones correspondientes. Sin embargo, cuando tenemos en cuenta el principio de Heisenberg aparece una nueva posibilidad. La energía necesaria para crear un fotón puede ser prestada. Pero dado que hay que devolverla, el fotón en realidad no es libre de escaparse. Debe permanecer cerca del electrón y desaparecer de nuevo pronto, siendo ab-

**Este libro se publica también en la colección Biblioteca Científica Salvat.*

sorbido por otro electrón o por el mismo. El fotón disfruta por tanto de una vida muy corta. Su duración dependerá de su energía. Un fotón suficientemente energético como para ser visible vive solamente una milésima de una billonésima de segundo, tiempo en el cual puede recorrer solamente una cienmilésima de centímetro (una longitud de onda) antes de ser "recapturado". Fotones aún más energéticos incluso no llegan tan lejos.

Llegamos al punto de preguntarnos ahora si hay un límite a la cantidad de energía que pueda tomarse prestada en el esquema de Heisenberg. Esta cuestión está íntimamente relacionada con la estructura interna del electrón y si es o no un objeto puntual. Si lo es, un fotón podrá ser emitido y reabsorbido en el mismo punto, y por lo tanto no necesitará recorrer distancia alguna. Por lo tanto puede ser reabsorbido instantáneamente, es decir, su tiempo de vida ser tan corto como queramos. En consecuencia, el préstamo de energía no tendrá límite, ya que puede ser devuelto instantáneamente.

Estas ideas implican que cada electrón ha de estar rodeado de una nube de fotones energéticos. Los fotones periféricos de la nube no son muy energéticos, pero los que están más hacia el interior llevan mucha energía. A medida que nos acercamos al electrón, la energía de la nube de fotones crece hacia el infinito. Dado que no podemos nunca separar a un electrón de este tenaz séquito de fotones, la energía total, y por tanto la masa, del electrón será infinita de nuevo, esta vez debido a la nube de fotones.

No es en absoluto trivial quitarse de encima este nuevo infinito. De hecho, hasta los años 40 los físicos no supieron cómo hacerlo. Resulta que formulando la teoría de manera que sea perfectamente compatible con la teoría de la relatividad se pueden eliminar los infinitos sin dañar la capacidad predictiva de la teoría. Afortunadamente, en el caso de las cargas eléctricas, las cantidades infinitas se pueden reemplazar siempre por sus valores medidos.

Una teoría en la que se pueden eliminar los infinitos se llama renormalizable. Aunque una teoría renormalizable no sea muy satisfactoria al menos es mejor que una teoría no renormalizable. En realidad, si no fuera porque nuestra teoría de las fuerzas electromagnéticas es renormalizable, gran parte de la física del siglo XX no hubiera sido posible. Pero en el caso de las otras fuerzas de la naturaleza –la gravedad y las fuerzas nucleares– es precisamente lo que ocurre, que aparentemente éstas no son renormalizables. Consideremos, por ejemplo, la llamada fuerza nuclear débil, que es responsable de algunas clases de desintegración radiactiva. La fuerza

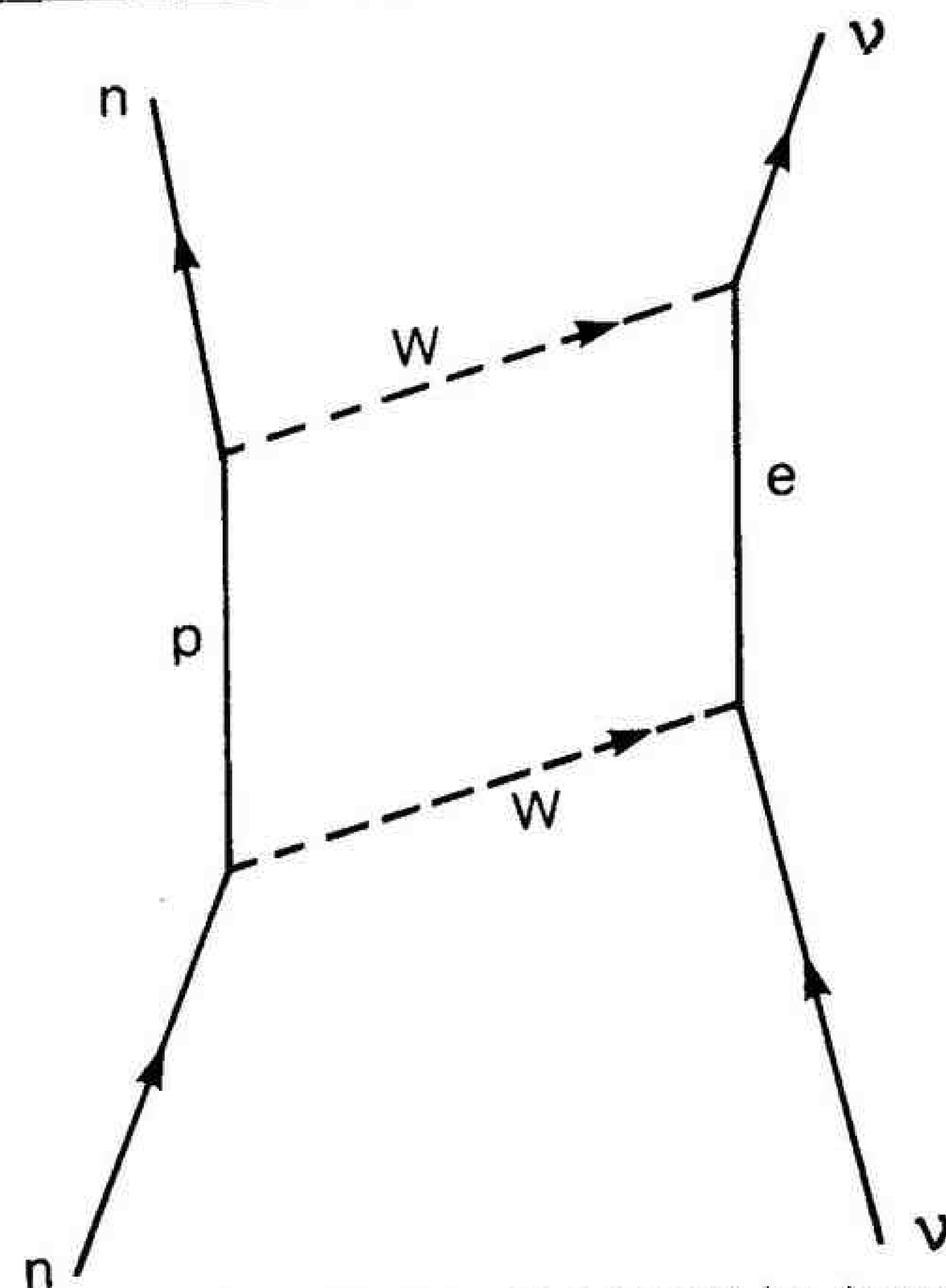


Fig. 16. Las líneas muestran (esquemáticamente) las trayectorias de las partículas subatómicas. El neutrón (n) y el neutrino (ν) intercambian una partícula W, y se transforman en un protón (p) y un electrón (e) respectivamente. Un segundo intercambio W les devuelve a su identidad original. Las leyes de la física subatómica predicen que este proceso origina una perturbación infinita.

débil produce una interacción poco intensa y de corto alcance entre las partículas subatómicas. Actúa debido a que se puede crear temporalmente una partícula llamada W con un préstamo de energía de Heisenberg, e intercambiarse por ejemplo entre un neutrón y un neutrino. Si la emisión de un fotón por un electrón solamente produce el retroceso de éste, la emisión de una W por un neutrón lo convierte en un protón, mientras que su absorción por un neutrino convierte a éste en un electrón. Si se intercambia entonces una segunda W, el par vuelve a su identidad original. Esta secuencia de sucesos se representa en la figura 16.

La fuerza débil es mucho menos intensa que la fuerza eléctrica

y en consecuencia el resultado de este pequeño intercambio debería ser una pequeña desviación en las trayectorias del neutrón y del neutrino. La teoría, en cambio, predice una perturbación infinita. Y esta vez el infinito no puede ser eliminado. Estos y otros infinitos aparecen una y otra vez en diferentes partes de la teoría, destruyendo por completo la capacidad predictiva de la misma. Cada vez que se elimina un infinito, aparece otro. Lo mismo ocurre con la gravedad cuántica –ésta es también una teoría no renormalizable–. Una inacabable sucesión de infinitos parece contaminar la teoría y le hace perder su significado.

En el caso de la fuerza débil, trabajos recientes indican que hay una solución al problema. Combinando cuidadosamente las fuerzas débil y electromagnética en una sola teoría, es posible renormalizar la combinación de ambas, a pesar de que la parte correspondiente a la débil, por sí sola, padece un ataque de infinitos imposible de controlar. Existen también esperanzas de que la otra fuerza nuclear pueda tratarse de forma parecida. Pero por el momento, nadie sabe cómo tratar los infinitos de la gravedad cuántica.

Antes de dejar el tema de las partículas subatómicas es importante que refiramos un importante episodio histórico relativo a los infinitos. Cuando Lord Rutherford y otros descubrieron por vez primera la estructura del átomo en la primera década del presente siglo, apareció una profunda paradoja. Se sabía que los electrones de un átomo giran alrededor del núcleo como los planetas alrededor del Sol, atraídos no por la gravedad sino por la fuerza eléctrica. El átomo más sencillo es el del elemento hidrógeno, que consiste en un solo protón alrededor del cual gira un único electrón. Mientras el electrón gira, acelera debido a que está obligado a moverse en una trayectoria curvada. Se sabe desde hace mucho tiempo que un electrón acelerado emite radiación electromagnética, como la luz, de forma que era natural suponer que el electrón en el átomo de hidrógeno emitiera luz.

El electrón es quien debe proporcionar la energía de la luz, y luego, a medida que va perdiendo energía, va cayendo hacia el protón. Pero cuanto más cerca esté, más rápido girará, debido a la fuerza eléctrica según la ley del inverso del cuadrado de la distancia. La razón es la misma por la cual los planetas interiores giran alrededor del Sol más deprisa que los exteriores. En consecuencia, el electrón radiará energía cada vez más rápido, a medida que va cayendo hacia el protón. En este colapso del átomo la energía radiada crecerá aparentemente sin límite.

La pregunta está ahora relacionada con la estructura del electrón y del protón. ¿Cuánto puede aproximarse el uno al otro? Olvidando por el momento que el protón está formado por quarks (los quarks no se conocieron hasta los años sesenta), podemos suponer que el electrón y el protón son objetos puntuales, sin estructura. Ello significa que podrán aproximarse sin límite y que por lo tanto no hay límite para la energía electromagnética que el átomo de hidrógeno puede radiar en su colapso. Para empeorar las cosas, el electrón alcanzará rápidamente al protón, es decir, su separación se hará cero, en un tiempo finito, de hecho en mucho menos de un segundo. De manera que no solamente el átomo es inestable, sino que además amenaza con dilapidar una cantidad infinita de radiación en un tiempo finito. Esta típica característica de tropezarnos con el infinito tras un tiempo finito, breve en realidad, aparecerá más tarde cuando examinemos el colapso gravitatorio. Es un signo de que hay algo que anda muy mal.

En el caso del átomo de hidrógeno, el fallo de los físicos de entonces era su incapacidad de tener en cuenta los aspectos ondulatorios de la materia a escala atómica tal como se propone en la teoría cuántica. Cuando esto se hizo finalmente en los años veinte, se vio que el electrón estaba en la práctica confinado a ciertas órbitas, o niveles de energía definidos, correspondientes a una especie de resonancia en las vibraciones ondulatorias. En estos niveles el electrón no puede radiar. La luz solamente se emite cuando el electrón efectúa una transición entre niveles. Esto ocurre a menudo, y el electrón salta de forma discontinua de un nivel a otro inferior. Hay, no obstante, un nivel mínimo de energía, o estado fundamental, por debajo del cual no puede estar el electrón, igual que con una cuerda de guitarra no se pueden obtener notas por debajo de un cierto valor. Por lo tanto, el colapso catastrófico no tiene lugar. En este caso la teoría cuántica nos ha salvado. Más adelante consideraremos si puede o no hacer lo mismo con el colapso gravitatorio.

Hay un punto final importante que merece ser destacado. Dejando de lado, por el momento, el carácter ondulatorio de las partículas e ignorando la emisión de radiación, podemos decir que si el electrón y el protón se soltaran ambos a partir del punto de reposo caerían aparentemente en línea recta el uno hacia el otro bajo su mutua atracción eléctrica. Si estuvieran inicialmente separados un centímetro, chocarían al cabo de menos de una milésima de segundo. En cambio, si hay un movimiento inicial cualquiera (que no sea dirigido el uno hacia el otro) las dos partículas no se encontrarán.

Ello es debido a que, si las partículas ocupan un punto, han de alinearse *exactamente* para que choquen. La menor desviación, por pequeña que sea, impedirá la colisión. Lo que ocurrirá entonces es que el electrón pasará de largo por las proximidades del protón, pero girará violentamente en torno a él y "rebotará" de nuevo hacia atrás en una trayectoria elíptica alargada. No obstante, cuando se incluyen los efectos de la radiación, el electrón será desviado en su trayectoria elíptica y podrá chocar con el protón, aunque éste sea solamente un punto.

Enfrentarse con el infinito ha sido una experiencia dura para matemáticos y físicos, y no digamos para filósofos y teólogos, algunos de los cuales también tuvieron que enfrentarse con la muerte. Pero vivimos en un mundo con abundantes infinitos –en la estructura del espacio y del tiempo, en la composición de la materia, en el movimiento de simples objetos y en la estructura interna de los átomos–. En el próximo capítulo veremos que el caso más misterioso se produce cuando la gravedad toma el control de la materia –y se dispara hacia el infinito–.

3. La crisis del espacio y del tiempo

"No hay nada que me desconcierte tanto como el tiempo y el espacio; y sin embargo, nada me desconcierta menos, ya que nunca pienso en ellos."

(Charles Lamb, 1775-1834)

Esta frase del notable ensayista inglés expresa en forma concisa la reacción instintiva de la mayoría de la gente cuando se habla del espacio o del tiempo. Son cosas que damos por supuestas. Su proximidad desalienta cualquier análisis profundo, ya que nos hace sentir incómodos. El espacio y el tiempo simplemente *estan ahí* –un escenario en el que el mundo interpreta su interminable drama– permanente, seguro e inmutable.

Cuando Einstein comenzó a meterse con las familiares y queridas creencias sobre el espacio y el tiempo, los científicos no tuvieron más remedio que volver a examinar los modelos tradicionales. El tiempo había sido considerado tradicionalmente como un flujo continuo, una especie de corriente, que se extendía hacia el infinito en el pasado y en el futuro. Por encima de todo el tiempo era uniforme y universal, sin titubeos, sin cambios; el regulador de la actividad que abarcaba a toda la naturaleza. Aristóteles nos decía que "el paso de la corriente del tiempo es igual en todas partes". Los cambios en las cosas materiales, seguía diciendo, "pueden ser rápidos o lentos; pero no así el tiempo". Newton era también explícito en cuanto a la naturaleza absoluta y universal del tiempo: "El tiempo absoluto, verdadero y matemático... transcurre uniformemente sin relación con nada externo." Por encima de todo, mantenía la tradición, las duraciones temporales son independientes de los cuerpos

materiales o de la posición y el comportamiento del observador que las mide.

También el espacio fue considerado durante siglos como fijo e inmutable. De nuevo Newton era explícito en esto: "El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece siempre igual e inamovible." En el siglo XIX, James Clerk Maxwell, escribiendo sobre la materia y el movimiento, consideraba el espacio absoluto "como siempre igual a sí mismo e inamovible". Que el espacio se moviera, razonaba, equivaldría a que un lugar se alejase de sí mismo.

Veremos lo equivocadas que resultaron ser estas primitivas ideas. No sólo estas entidades no son universales y absolutas, sino que están sujetas a cambios, y pueden moverse con una violencia superior a la de todas las otras fuerzas de la naturaleza.

A comienzos de este siglo las cosas comenzaron a ir mal para el perfecto esquema de un espacio y un tiempo universales e inalterables. La crisis central tuvo que ver con el movimiento de las señales de luz, tema que se demuestra de tal importancia en el desarrollo de este libro que debe ser considerado con algún detalle.

Para concentrarnos en las peculiaridades implícitas del tema, imaginemos dos observadores, A y B, separados por una gran distancia. Se fijan la tarea de medir la velocidad de la luz (que es considerable, unos 300.000 kilómetros por segundo) cronometrando el paso de pulsos de luz entre ellos. Supongamos que su separación es de 300.000 kilómetros y que sincronizan cuidadosamente sus relojes al comienzo del experimento. A envía un pulso de luz a B en un instante preestablecido, y un segundo después B observa un destello: la llegada del pulso. Ésta fue la técnica utilizada en 1675 por Olaus Roemer, quien midió la velocidad de la luz cronometrando la duración de su viaje desde Júpiter a través del sistema solar, que es de aproximamente una hora. Como es natural, no tenía al servicial ayudante A, sino que utilizó en su lugar el movimiento de los satélites de Júpiter, cuyas posiciones podía calcular de antemano. Desde la Tierra parecía que los satélites llegaban siempre tarde a sus posiciones calculadas, debido al hecho de que la luz ha de llegar hasta nosotros desde Júpiter a través del espacio intermedio. Conociendo la distancia a Júpiter, la medida del retraso proporcionó un valor razonablemente exacto de la velocidad de la luz.

Supongamos ahora que tenemos un experimento un poco más sofisticado. Los observadores A y B quieren comprobar si la velocidad de la luz varía desde un lugar a otro. Para averiguarlo, cada uno

mide no solamente el tiempo que emplea la luz en ir de uno a otro, sino también el tiempo que los mismos pulsos de la luz tardan en recorrer un tubo de un metro situado en uno y otro lugar. Esta última medida requiere de una electrónica sofisticada, dado que el tiempo que tarda la luz en recorrer el tubo es menor que una cienmillonésima de segundo. Después de algunas pruebas, A y B llegan finalmente a la conclusión de que no solamente es igual la velocidad de los pulsos de luz en los tubos de A y de B sino que además esta velocidad es exactamente la misma que la velocidad media tomada en todo el trayecto.

Ahora cambiamos un poco el experimento. En lugar de que A y B permanezcan en reposo, B se moverá hacia A. Como quiera que se acerca a los pulsos de luz que le llegan, B espera lógicamente que estos pulsos, a su llegada, recorrerán el tubo que él lleva algo más rápidamente que en el experimento anterior. Para asombro suyo la velocidad no cambia. Le pide a A que compruebe si la velocidad de salida ha cambiado y A responde que todo está igual, nada ha cambiado en su posición. Y aún más, la velocidad deducida por cronometraje del tiempo que han tardado los pulsos en ir de A a B queda de manifiesto que es la misma que antes.

En plena consternación, B coge un potente cohete y vuela hacia A a toda máquina. B corre hacia A cada vez más deprisa en un intento de dar cada vez más rápidamente con los pulsos que llegan, pero la velocidad local medida "en el tubo" permanece obstinadamente constante. B alcanza pronto la mitad de la velocidad de la luz y observa que los pulsos que llegan parecen ahora muy azules. Éste es un fenómeno conocido. B se percata de que la luz azul es luz de alta frecuencia y recuerda que las ondas sonoras también corren hacia frecuencias mayores cuando la fuente y el observador se precipitan el uno hacia el otro. El efecto se llama corimiento Doppler y es perceptible en el tono más agudo del ruido del motor de un coche que se acerca rápidamente. Las ondas sonoras se "apelotonan" delante del coche que se acerca.

A pesar del corrimiento Doppler, B no registra ningún cambio en *la velocidad* de la luz. Viaja ya al 99 % de la velocidad de la luz, derecho hacia los pulsos, pero éstos siguen llegando a él a sólo 300.000 kilómetros por segundo. B le pide a A que haga una comprobación final de que no está enviando pulsos de luz lentos, pero A responde que sus pulsos son lanzados a toda velocidad = 300.000 kilómetros por segundo. Los dos observadores comienzan a darse cuenta de que algo muy extraño está pasando.

Para cerciorarse de estos extraordinarios resultados, B da la vuelta al cohete y vuela a toda máquina en dirección contraria, corriendo delante de los pulsos de luz. Observa ahora que la luz es muy roja, las ondas se alargan como cuando un coche pasa y se aleja y el ruido de su motor toma un tono más grave. Pronto B se está alejando de A al 99 % de la velocidad de la luz. Piensa que la luz llegará hasta él, solamente a un uno por ciento de la velocidad "normal" (es decir, a 3.000 kilómetros por segundo). ¡Pero nada de eso! Los pulsos siguen llegando todavía a la misma velocidad que cuando B corría hacia ellos. Su tremendo cambio de velocidad, en casi dos veces la velocidad de la luz, no ha cambiado la velocidad de los pulsos ni en un solo kilómetro por hora. Por última vez B le pregunta a A si está disparando los pulsos más rápidamente, pero A mide exactamente la misma velocidad de los pulsos que B, aunque estén moviéndose velozmente el uno respecto al otro.

Todavía se hace un último y desesperado intento por salir del atolladero. B anuncia que pondrá en marcha el motor especial del cohete y que dejará atrás a los pulsos. Evidentemente, viajando más rápido que la luz, los pulsos no podrán ya alcanzarle. En algún punto entre el 99 y el 101 % de la velocidad de la luz, los pulsos *tendrán* que ir más despacio y quedarán atrás. Mientras se realiza esta parte del experimento, A observa que B se va acercando lentamente a la velocidad de la luz, pero que cuanto más se acerca, mayor potencia necesita para acelerar. Las necesidades de potencia parecen crecer sin límite. Incluso con toda la energía del mundo, B no puede arañar el último incremento necesario para romper la barrera de la luz. Parece que cuanto más cerca está B de la velocidad de la luz, más pesado se vuelve el cohete. Necesita más y más potencia para acelerar sólo un poco. La energía extra parece emplearse totalmente para incrementar más y más la masa, no la velocidad. Y los pulsos siguen llegando a la misma velocidad que al comienzo del experimento. Finalmente, acabado el combustible, los observadores abandonan todo intento de variar la velocidad de la luz de 300.000 kilómetros por segundo medida localmente.

Esta pequeña historia es una versión moderna de los experimentos reales que se realizaron a finales del siglo XIX y que se han venido repitiendo desde entonces de formas variadas en multitud de ocasiones. Pone de manifiesto la casi paradójica naturaleza de la propagación de la luz, pues A y B miden la misma velocidad de la luz, incluso cuando se mueven rápidamente el uno con respecto al otro. Einstein dio la explicación en su llamada teoría especial de la relatividad, publicada en 1905. Einstein propuso que la velocidad de la luz es siempre la misma para todo observador, independientemente de su estado de movimiento y de cómo se mueve la fuente de luz. Para que esta restricción tenga sentido es necesario suponer que quienes cambian con el movimiento son el *espacio* y el *tiempo* y no la velocidad de la luz. Por ejemplo, cuando B corre hacia A, la distancia de A a B, medida por B, se contrae. Si B observa objetos conocidos que rodean a A los ve aplanados. Desde luego para A estos objetos siguen siendo perfectamente normales.

Además de la peculiar contracción del espacio, el movimiento de B tiene un extraordinario efecto sobre el tiempo. B observa que el reloj de A se mueve más lentamente que el suyo, mientras A observa que es el reloj de B el que va más lento. No solamente sus imágenes de las distancias espaciales son diferentes, sino también sus escalas temporales. En realidad, cuando A y B se reúnen finalmente al acabar el experimento, B descubre que su reloj está retrasado en muchas horas respecto al de A, debido a su movimiento. La secuencia de sucesos desde el principio hasta el final del experimento ha durado mucho más para A de lo que la *misma* secuencia de sucesos ha tardado para B.

Qué ideas más extraordinarias; desafían totalmente a las concepciones del espacio y del tiempo mantenidas durante siglos y que hemos descrito al inicio del capítulo. Desde que se aceptó la teoría de Einstein, y se han confirmado sus predicciones experimento tras experimento, las distorsiones del espacio y del tiempo causadas por el movimiento no han dejado de estar en candelero. Los libros de divulgación científica han tratado extensamente sobre las particularidades del viaje espacial ultrarrápido, en relación con los astronautas que vuelven de sus breves viajes por el Cosmos y encuentran que en su planeta han pasado miles de años. Lo que hace que estos hechos sean tan misteriosos es que se apartan de la imagen del mundo que nos proporciona el sentido común, imagen en la que el espacio y el tiempo –distancia y duración– son fijos para todos los observadores, cualquiera que sea su tipo de movimiento. En la teoría de Einstein, en cambio, la velocidad de la luz es fija, deja que el espacio y el tiempo cambien según el movimiento del observador de tal manera que esta velocidad sea siempre la misma.

De lo anterior se deduce que por mucho que acelere el cohete, o cualquier otro cuerpo material, no logrará sobrepasar la velocidad de la luz. El espacio y el tiempo se irán distorsionando indefinidamente de tal manera que la barrera de la luz seguirá sin poderse

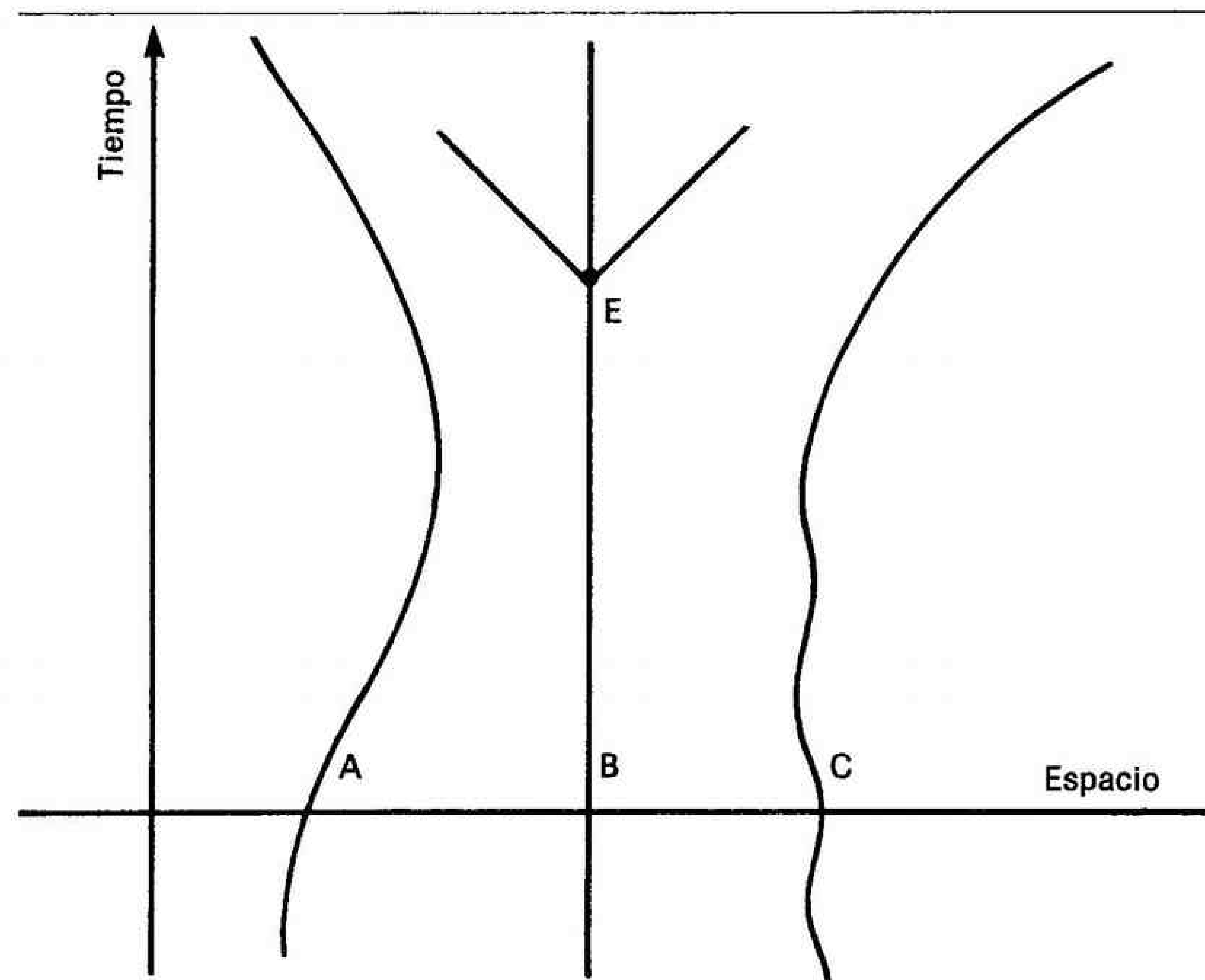


Fig. 17. *Diagrama de espacio-tiempo.* El tiempo se mide verticalmente, el espacio horizontalmente. Las líneas se pueden considerar como trayectorias de las partículas en el espacio-tiempo, o simplemente como una gráfica que muestra dónde están las partículas en sucesivos instantes. Un punto como el E se llama un suceso. Los rayos de luz que salen de este suceso viajan por el espacio a velocidad constante, de forma que se dibujan en el diagrama como líneas rectas.

romper. En los modernos aceleradores de partículas se hacen girar los fragmentos atómicos hasta alcanzar velocidades que solamente difieren de la velocidad de la luz en un 0,01 %. Se observa que estos fragmentos se vuelven docenas de veces más pesados que cuando están en reposo, lo que hace que cada vez sea más costoso incrementar su velocidad. Y no es sólo la materia, sino que ninguna señal puede viajar de un sitio a otro más rápidamente que la luz. Esto destruye el supuesto, utilizado casi unánimemente por los escritores de ciencia ficción, de que la comunicación en la era espacial puede ser instantánea en todo el Universo.

Para entender mejor la teoría de Einstein del espacio y del tiempo dibujaremos un diagrama. La figura 17 es lo que se denomina un mapa del espacio-tiempo, y en ella el tiempo corre en línea vertical, mientras que en la horizontal se representa una dimensión del espacio. No hay nada complicado o misterioso en un mapa del espacio-tiempo; es solamente una gráfica en donde los objetos están representados en diferentes instantes. Por ejemplo, la línea señalada con una A representa el recorrido de un cuerpo que se mueve hacia la derecha y después hacia la izquierda. La línea señalada con una B representa una partícula que permanece en reposo con respecto a la persona que ha dibujado el diagrama. La línea C representa otra partícula que primero oscila a derecha e izquierda y después se dispara hacia la derecha a velocidad creciente. Estas trayectorias sobre el mapa del espacio-tiempo se llaman "líneas de universo" y muestran la historia de los cuerpos en movimiento.

También podemos dibujar en el diagrama los pulsos de luz. Si medimos el tiempo en segundos y la distancia en segundos luz, las trayectorias de los pulsos de luz serán líneas rectas inclinadas en 45°. Hemos dibujado dos pulsos de luz que salen del cuerpo B en direcciones opuestas en el instante marcado con una E.

Si un observador no está en reposo con respecto al cuerpo B, sino que viaja a gran velocidad hacia la izquierda, verá a B moviéndose hacia la derecha. Los demás objetos también tendrán, superpuesta a su movimiento, una velocidad suplementaria hacia la derecha. Si ahora este nuevo observador dibuja un diagrama espaciotemporal tendrá aproximadamente las mismas características que la figura 17, pero las líneas de universo de los cuerpos estarán algo inclinadas hacia la derecha. Observemos, no obstante, que los rayos de luz deben estar todavía inclinados 45°. No les afecta la nueva perspectiva, ya que el observador en movimiento ve los pulsos de luz viajando a 300.000 kilómetros por segundo. Así, las líneas de luz del diagrama son una característica fija e invariante, independiente del movimiento del observador. El hecho de que las líneas de luz sean las mismas para todos los observadores, independientemente de su movimiento, tiene un profundo significado geométrico, puesto de manifiesto por vez primera por el físico alemán Hermann Minkowski en 1908. El diagrama espacio-temporal, visto desde la perspectiva de un observador en movimiento, tendrá regiones, lejos de las líneas de luz, en que se producirán variaciones debido al movimiento. Este reajuste, no obstante, está sometido a limitaciones, de forma que las trayectorias de los rayos de luz permanecen inalteradas. Se deduce de esto que el espacio y el tiempo deben reajustarse en cooperación para evitar que se modifiquen estos rayos. Ya se ha dicho que el

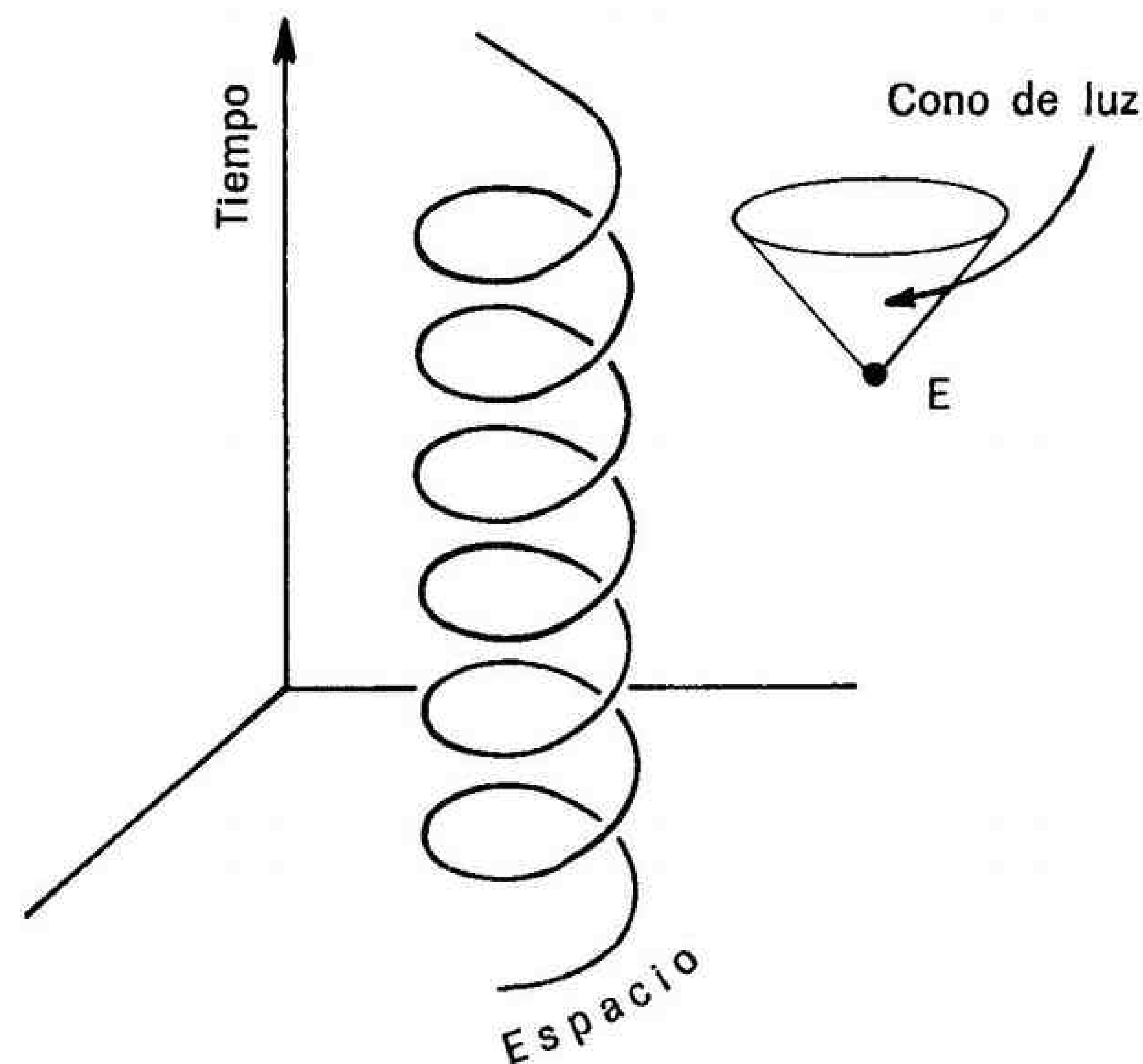


Fig. 18. Este diagrama de espacio-tiempo muestra dos dimensiones del espacio. Las secciones horizontales representan todo el espacio en un instante. La hélice es la linea de universo de una particula que se mueve en circulo. El cono está formado por todas las trayectorias de los rayos de luz que salen del suceso E y se alejan a velocidad constante en todas direcciones. Los circulos que se obtienen cortando horizontalmente la superficie del cono se deben considerar como esferas de luz emitidas por E que se expanden hacia fuera.

movimiento distorsiona tanto los intervalos de distancia como los de tiempo. Vemos ahora que los cambios en cada uno de ellos deben ser dispuestos de modo que dejen inalterados los rayos de luz. La conclusión es que el espacio y el tiempo no son entidades independientes, sino que están íntimamente relacionadas de forma que la luz disfrute de sus especiales propiedades. Por este motivo los físicos ya no piensan en el espacio y el tiempo, sino en el espacio-tiempo, una estructura cuatridimensional unificada.

En la figura 18 hemos añadido una dimensión adicional al esquema. Imaginemos que tomamos secciones horizontales en la figura tridimensional, y que cada una de ellas representa el espacio en un momento dado de tiempo. Una sección superior al conjunto representaría el espacio en un tiempo posterior. Las líneas de universo pueden ser espirales, representando el movimiento en más de una dimensión. Por ejemplo, la trayectoria helicoidal dibujada en el diagrama corresponde a la línea de universo de un cuerpo que da vueltas en círculo.

Si un cuerpo estacionario emite de pronto un pulso de luz en todas direcciones, las trayectorias de los rayos que se alejan estarán sobre un cono en esta figura tridimensional. El cono está generado por las líneas de luz oblicuas de la figura 17, girando alrededor de un eje vertical. Esta estructura, llamada *cono de luz*, desempeñará un papel central en lo que sigue.

Obviamente las secciones bidimensionales que representan el espacio en un instante son solamente una imagen imperfecta del mundo real, en el cual el espacio es tridimensional. El diagrama, pretende mostrar a la vez el espacio y el tiempo, y si utilizáramos todas las direcciones del dibujo para representar las tres dimensiones espaciales, no nos quedaría ninguna para representar el tiempo. Por consiguiente, en lo sucesivo no intentaremos representar en su totalidad el espacio y el tiempo (lo cual requeriría *cuatro* dimensiones) y confiaremos en la habilidad del lector para considerar una representación bidimensional del espacio tridimensional.

Para aclarar totalmente este punto, en la figura 19 se muestran varios objetos junto con sus representaciones bidimensionales. Podemos imaginar la versión bidimensional como un corte o sección

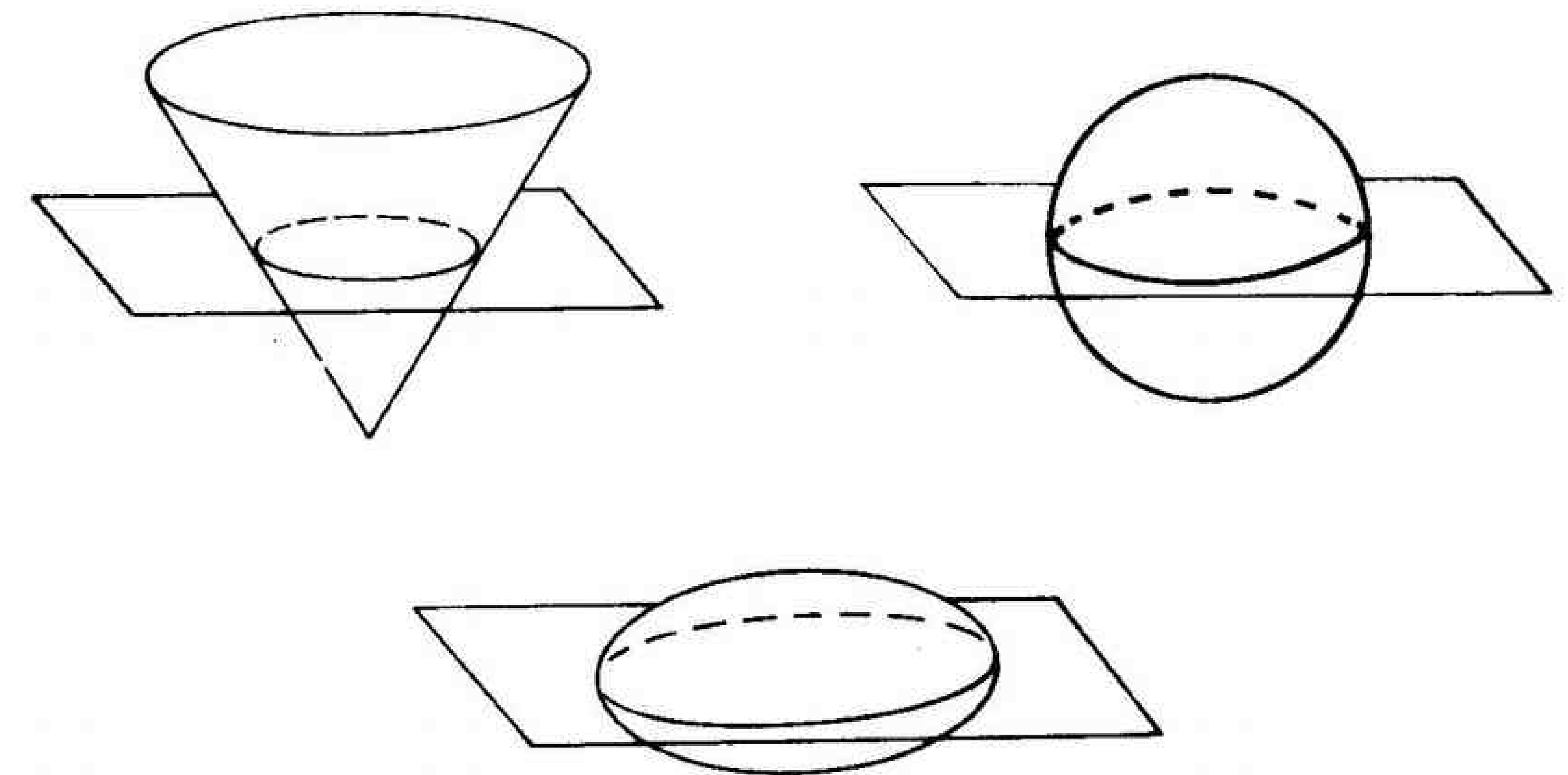


Fig. 19. Los objetos tridimensionales dan secciones bidimensionales al ser cortados.

del objeto sólido. La esfera, por ejemplo, se convierte en un círculo que obtenemos tomando un corte cualquiera de la esfera.

Podemos considerar las secciones bidimensionales del diagrama espacio-tiempo como instantáneas del Universo en un tiempo dado. Si imaginamos que se apilan estas secciones una encima de otra, las instantáneas se convierten en una película y podemos seguir, fotograma a fotograma, la evolución del sistema. Las secciones horizontales del cono de luz, por ejemplo, son círculos de radio creciente. De acuerdo con la correspondencia entre los círculos, en las secciones bidimensionales del espacio, y las esferas del espacio tridimensional real que hemos mencionado, se deduce que éstas "instantáneas" del cono de luz representan superficies esféricas de luz. Estas esferas son imágenes, en sucesivos instantes, del frente de ondas de un pulso de luz, a medida que se va extendiendo en todas direcciones. Tomando secciones en el diagrama cada vez más arriba los círculos van creciendo, representando la esfera de luz en expansión en el espacio real. El cono de luz es de capital importancia en cualquier análisis de la estructura del espacio-tiempo debido a su relación con la causalidad. Como no hay nada que pueda viajar más rápido que la luz, ninguna influencia causal de su vértice puede pasar del interior al exterior del cono de luz.

Un punto en el espacio-tiempo corresponde a un lugar determinado en un instante dado. Los físicos llaman a este punto un suceso, y consideran el espacio-tiempo como un conjunto infinito de sucesos. Evidentemente, un suceso entendido en este contexto no quiere decir que ocurra nada especialmente espectacular, pero si imaginamos que todos los puntos del espacio tienen asociado un pequeño reloj imaginario, entonces un suceso no es más que un instante en uno de esos relojes. El punto básico de la causalidad es entonces qué sucesos pueden influir a otros. Antes de Einstein se suponía que cualquier par de sucesos podía, en principio, conectarse mediante una señal o influencia de alguna clase. Se suponía, por ejemplo, que la gravedad se propagaba instantáneamente a través del espacio, de forma que si, por algún prodigio, la Luna desapareciera de pronto, las mareas cesarían en el mismo instante, incluso aunque no *viéramos* la desaparición de la Luna hasta un segundo más tarde, siendo éste el tiempo aproximado que tarda la luz de la Luna en llegar a la Tierra. A partir de la teoría especial de la relatividad de Einstein se vio que ninguna señal podía viajar más rápida que la luz sin producir un caos causal.

Una forma sencilla de entender el problema consiste en imaginar un cohete que viaja al 99 % de la velocidad de la luz y pase cerca de la Tierra (véase figura 20). En el centro exacto del cohete hay un mecanismo que envía un pulso de luz corto en ambas direcciones a lo largo del cohete. Naturalmente, un observador en el cohete verá que los pulsos de luz llegan simultáneamente a las paredes de los extremos, porque ambos pulsos viajan a la misma velocidad: la velocidad de la luz. Pero la situación, vista desde la Tierra es diferente. De acuerdo con la teoría de la relatividad, la velocidad de la luz es la misma cuando la mide el observador terrestre. En particular, los dos pulsos de luz viajan a la misma velocidad *respecto a la Tierra*. Por lo tanto, y dado que el observador terrestre ve el cohete volando hacia adelante al 99 % de la velocidad de la luz, los pulsos no llegarán simultáneamente. En su lugar, el terrestre ve que la pared posterior del cohete avanza rápidamente al

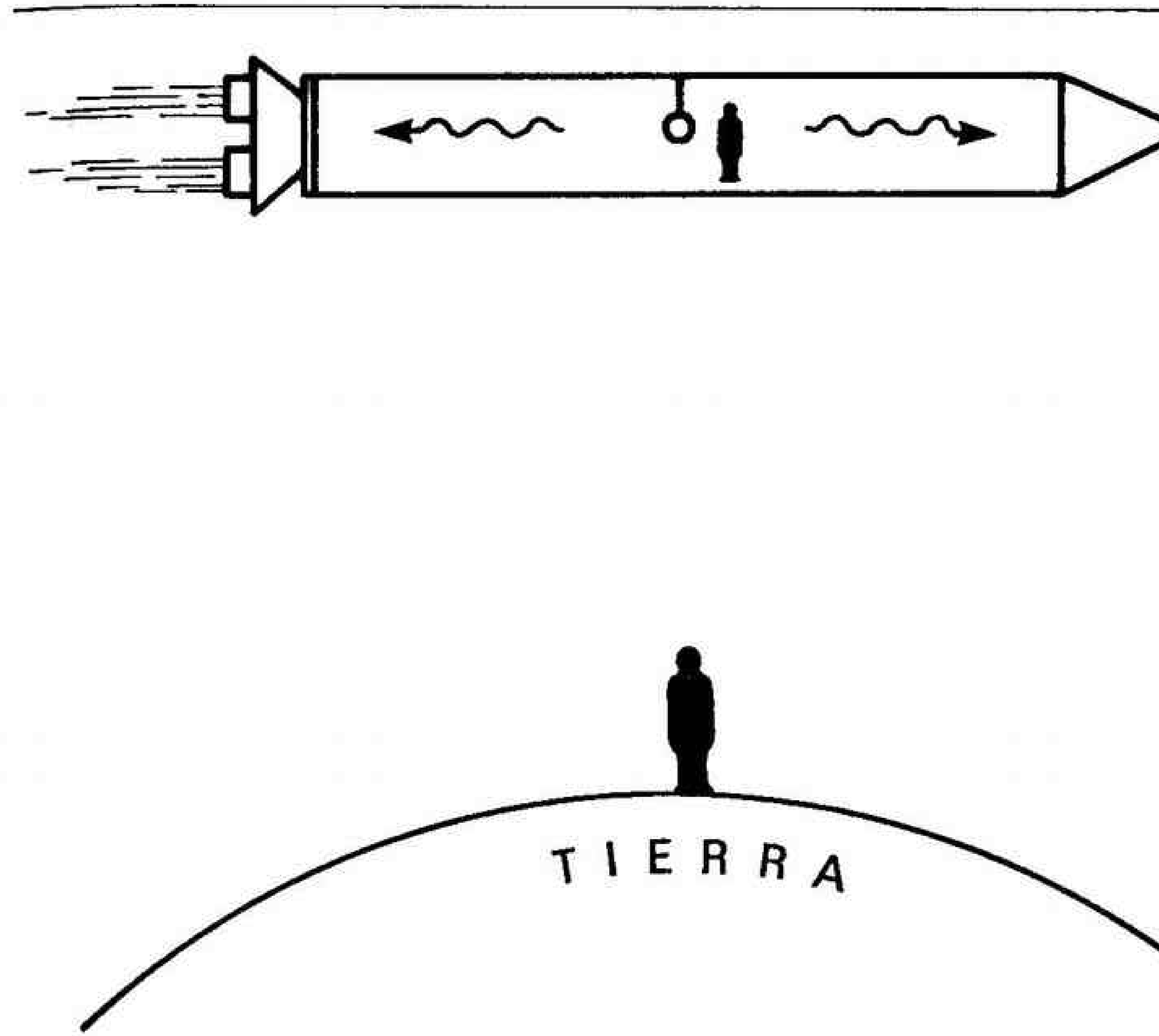


Fig. 20. Los dos pulsos de luz, que viajan a la misma velocidad, vistos desde el cohete llegan a los extremos del mismo simultáneamente. Pero vistos desde la Tierra, los pulsos *también* viajan a la misma velocidad, de manera que el de la izquierda llega antes al extremo que se acerca hacia él.

encuentro del pulso, mientras que la pared delantera se aleja del pulso. En el tiempo que emplea la luz para viajar por el cohete, éste se habrá movido hacia adelante de forma apreciable y el pulso posterior llegará a la pared antes que el otro llegue a la parte frontal del cohete. Lo que para el observador del cohete eran sucesos simultáneos parecen sucesos separados temporalmente vistos desde la Tierra. La conclusión es que la simultaneidad es relativa al estado del movimiento. No hay un acuerdo universal y absoluto en lo que es "el mismo instante" en lugares separados.

Los problemas que aparecen cuando los sucesos simultáneos ya no son considerados como tales por otra persona consisten en que ya no podemos llegar a un acuerdo sobre la definición de "instantáneo". Una señal que viaje "instantáneamente" desde el frente a la cola del cohete (por ejemplo "ha llegado el pulso de luz") desde el punto de vista del observador del cohete, será considerada por un observador terrestre como una señal que se propaga *hacia atrás* en el tiempo. Como desde la Tierra vemos que el pulso de luz alcanza a la pared anterior *después* que a la posterior, la aparentemente "instantánea" señal del frente a la cola parece desde la Tierra que es una señal desde un suceso posterior a otro anterior.

Las paradojas que pueden presentarse cuando las señales pueden viajar hacia atrás en el tiempo son de sobras conocidas. Consideremos, por ejemplo, una máquina que lleva programadas en su ordenador las siguientes instrucciones. A las tres emite una señal hacia el pasado. La señal se refleja en algún lugar lejano y llega de vuelta a la máquina a la una. Al recibir esta señal, el programa de la máquina le ordena a ésta que se autodestruya a las dos. Esta secuencia de sucesos carece de sentido, ya que la destrucción a las dos impediría la transmisión a las tres, la recepción a la una, y por lo tanto *no* desencadenaría el mecanismo de autodestrucción, en contradicción con el supuesto original.

Dado que la transmisión de señales más rápidas que la luz está descartada por motivos causales, es evidente que ciertos sucesos no podrán influir, o ser influidos, por otros sucesos. Esto se ilustra en la figura 21, que muestra el cono de luz que sale de un suceso E. También se muestra el cono de luz hacia atrás, extendiéndose hacia el pasado. Esto representa una superficie esférica de luz que converge hacia el suceso desde el espacio lejano. De acuerdo con el principio de que ninguna señal puede sobrepasar la velocidad de la luz, sucesos como el E', fuera del cono de luz de E no pueden de ninguna forma ser influidos, o influir en E. Por el contrario, sucesos

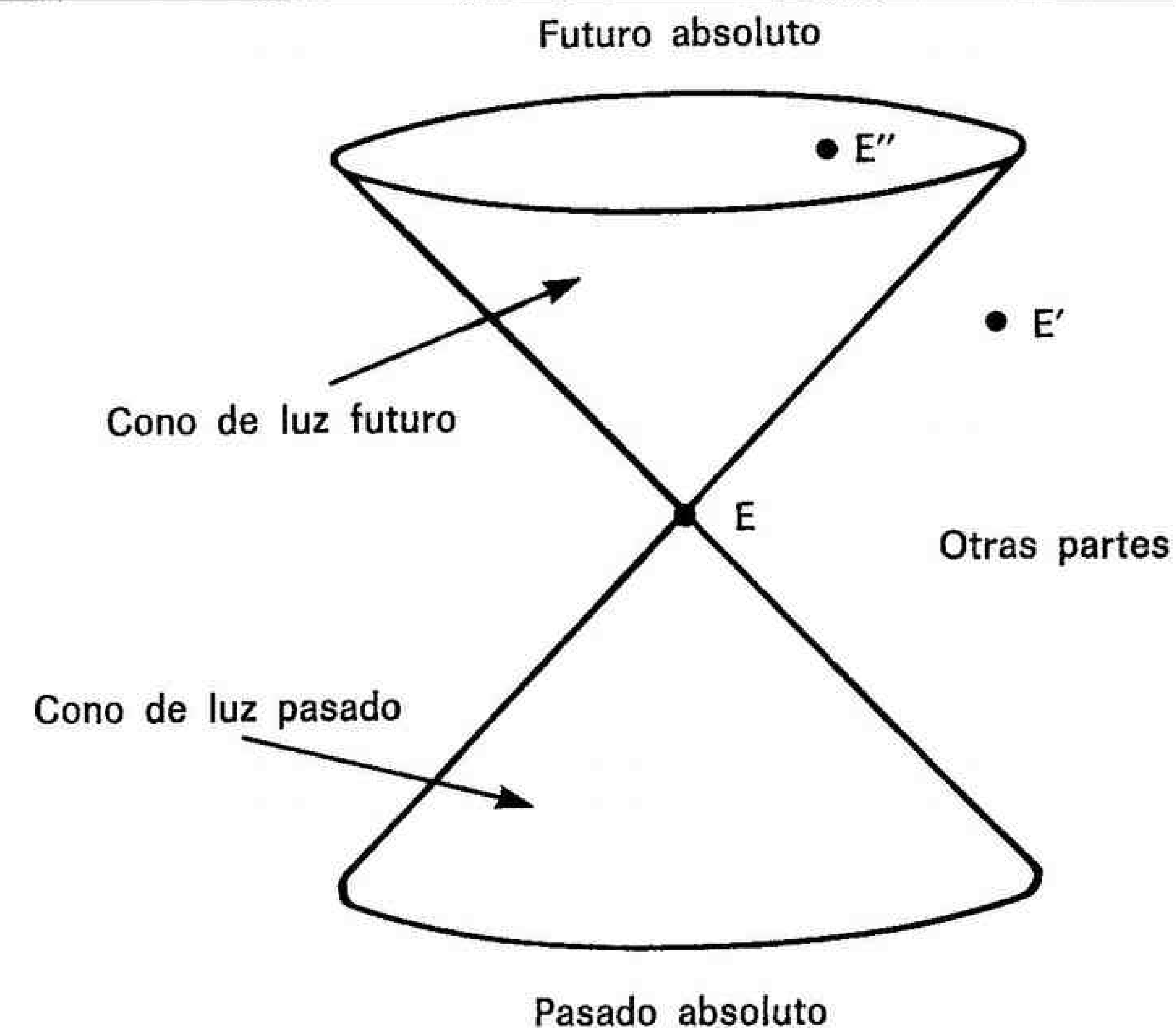


Fig. 21. La luz regula la estructura causal del espacio-tiempo. Divide a los sucesos que pueden influir uno a otro de los que están causalmente desconexos.

(como el E'') en el interior o sobre el cono de luz futuro pueden ser influidos por lo que ocurra en E. También los sucesos en el interior o sobre el cono de luz pasado pueden influir sobre lo que ocurre en E. Por este motivo llamamos a estas regiones futuro absoluto, pasado absoluto y "otras partes". Estas relaciones causales entre los sucesos son, como veremos, un ingrediente fundamental en la investigación de la existencia de singularidades desnudas.

El hecho de que todos los cuerpos materiales deban viajar a menos velocidad que la luz significa que a todo lo largo de la línea de universo de un cuerpo, el cono de luz se extiende a su alrededor. La situación que se muestra en la figura 22, en la que una línea de universo atraviesa su propio cono de luz, está estrictamente prohibida, ya que correspondería a un cuerpo que adelanta a un pulso de luz. Naturalmente la línea de universo de una partícula puede atravesar el cono de luz de otra. La figura 23 muestra cómo los conos

de luz que salen de sucesivos instantes a lo largo de una línea de universo cortan a otra cercana, proporcionando información sobre los sucesos E_1, E_2, E_3... Antes de que estos conos de luz lo intersecten ningún cuerpo puede obtener información sobre estos sucesos.

Además de que no se puede violar la causalidad, hay otra condición necesaria para que todo cuerpo deba viajar más lentamente que la luz. Esta condición tiene que ver con la topología del tiempo. Para evitar complicaciones, es necesario que el futuro absoluto y el pasado absoluto sean distintos; en otras palabras, ningún suceso puede pertenecer *a la vez,* al futuro absoluto y al pasado absoluto de ningún otro suceso. Evidentemente esto no puede ocurrir en los diagramas espacio-temporales que hemos dibujado hasta el momento, pero si en lugar de dibujar las figuras en una hoja plana de papel, cortamos éste por arriba y por abajo en algún sitio y lo enrollamos formando un cilindro como se muestra en la figura 24, en-

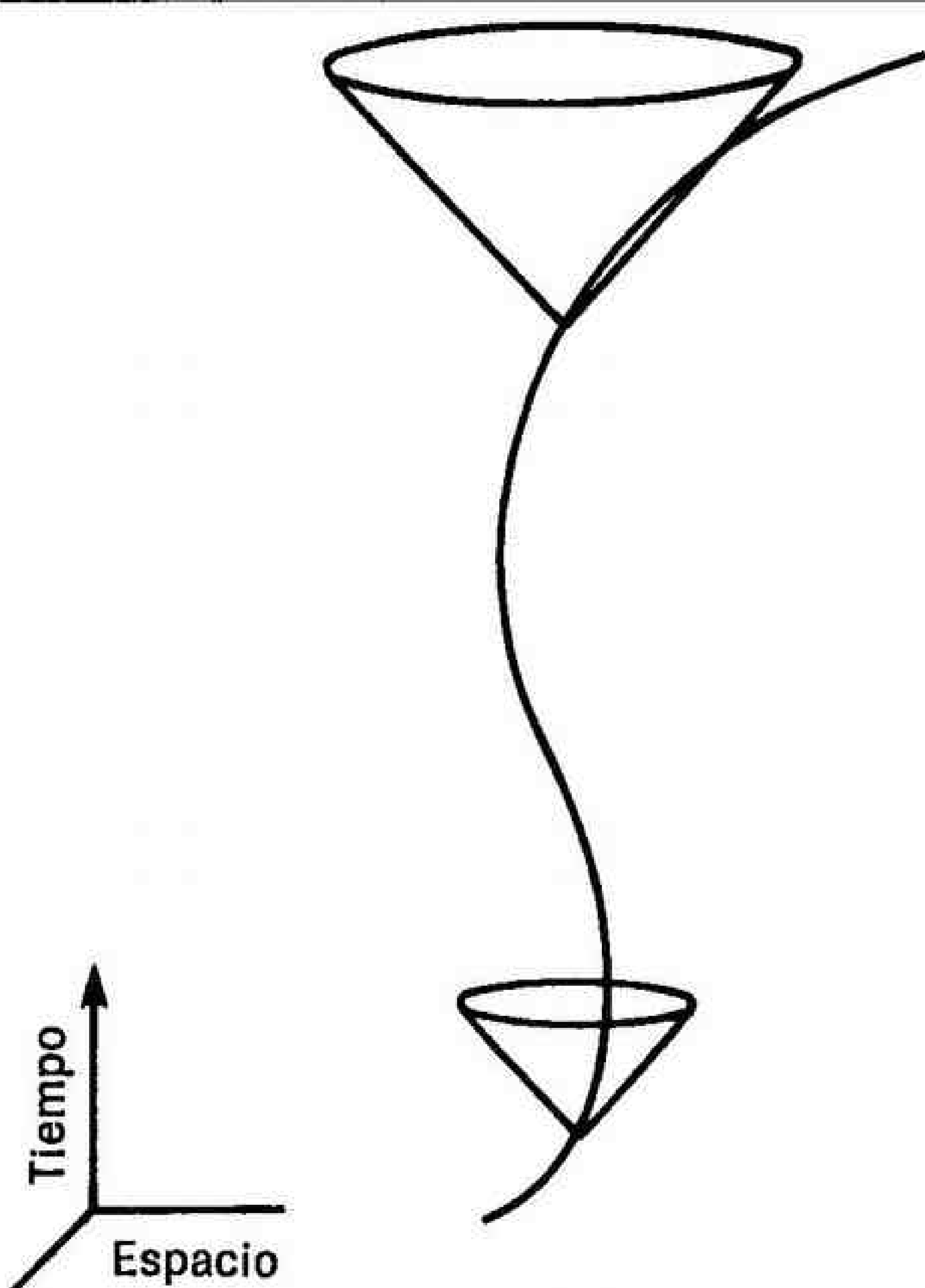


Fig. 22. La línea de universo de un cuerpo no puede atravesar su propio cono de luz (cono superior), ya que ello supondría adelantar a un pulso de luz.

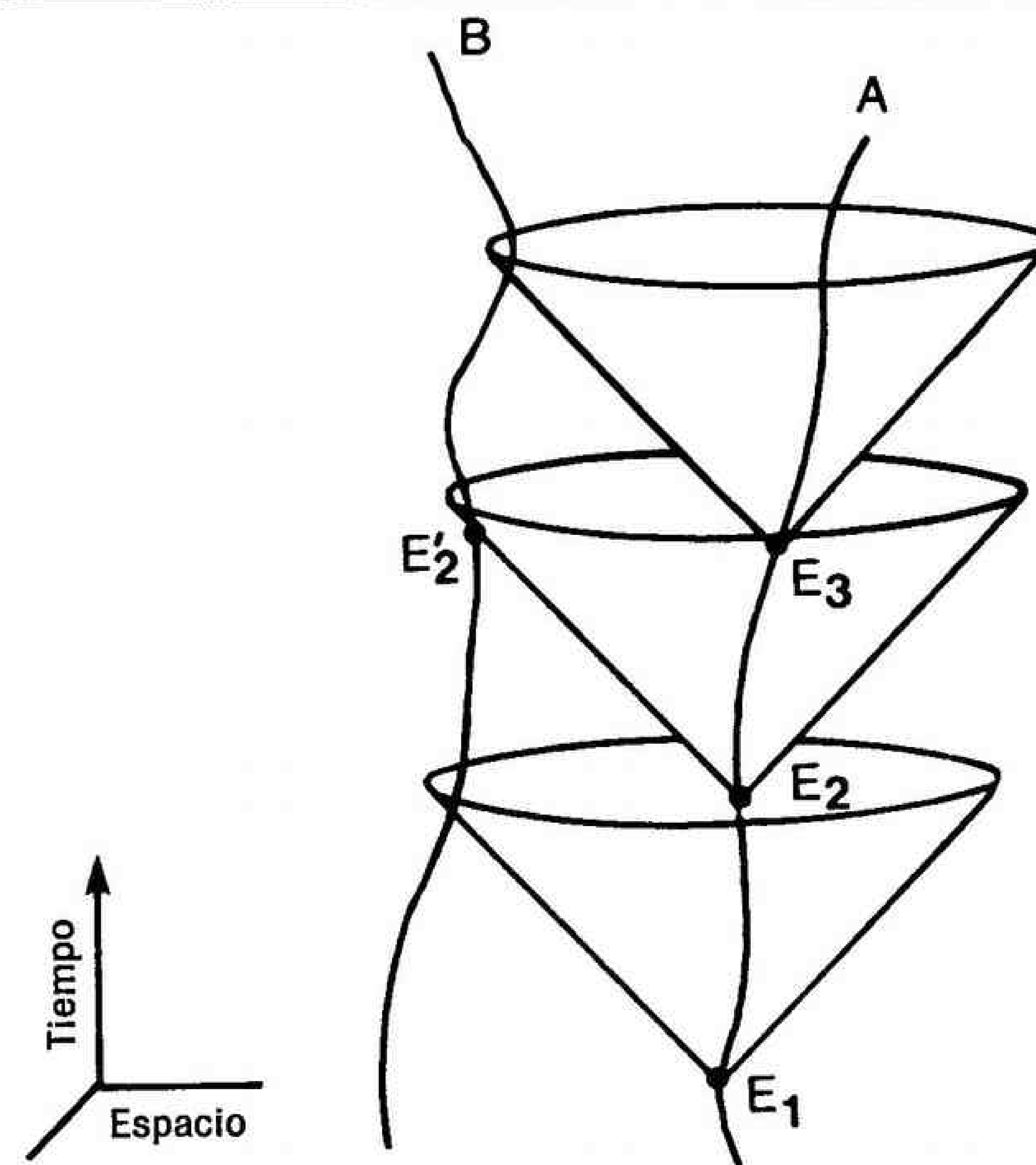


Fig. 23. Los conos de luz que salen de la línea de universo de un cuerpo A son portadores de las primeras noticias que pueden llegar a conocerse sobre los consecutivos sucesos E_1, E_2, E_3... que le ocurren a A. Cuando estos conos intersectan la línea de universo de B éste puede tener noticia de estos sucesos. Por ejemplo, en el suceso E'_2 B tiene noticia de una anterior experiencia de A en E_2. B no puede todavía saber de E_3, y ya ha sabido de E_1.

tonces podemos desde luego esperar problemas. Enrollar el diagrama formando un cilindro no afecta en nada a la geometría de las líneas que hemos dibujado (las distancias y los ángulos no cambian, ya que no estiramos ni retorcemos ni encogemos el papel) de forma que localmente es idéntico a la hoja plana. Pero en cambio su topología global es totalmente diferente. En lugar de que el tiempo se extienda infinitamente hacia el pasado y hacia el futuro, el tiempo es ahora finito y de longitud igual a la de la circunferencia del cilindro. Este modelo del espacio y del tiempo representa una especie de Universo cíclico.

La naturaleza de los conos de luz en un modelo como el anterior es muy extraña. La línea quebrada representa la línea de universo de un cuerpo, con un suceso E señalado sobre la misma, junto con los conos de luz anterior y posterior. El suceso E′ que ocurre cerca de este cuerpo está dentro del futuro absoluto de E, es decir, dentro del cono anterior. Pero también está dentro del pasado absoluto de E, en el cono posterior. En este espacio-tiempo el pasado puede ser también el futuro. En realidad, si el cuerpo es un observador, le será posible visitar su propio pasado siempre y cuando espere el tiempo suficiente: la línea de universo se cierra en círculo y si el cono de luz anterior se desliza hacia delante a lo largo de la línea de universo, intersectará al cono de luz pasado, después de dar una vuelta al cilindro. El fantasma de un pasado y un futuro entremezclados de esta forma es por lo general suficiente como para sugerir a los físicos que un espacio-tiempo como éste no puede corresponder a la realidad.

El comportamiento de los conos de luz se torna mucho más interesante cuando se toma en cuenta la gravedad. Se conocen los efectos de la gravedad sobre la luz desde que Einstein formuló su llamada teoría general de la relatividad, publicada en 1915. La gravedad afecta a la luz de dos maneras importantes. Una es la curvatura de los rayos de luz por un campo gravitatorio, como se ilustra en la figura 25. Un rayo de luz de una estrella a su paso cerca del Sol se desvía o curva hacia éste de la forma que se muestra. Tal

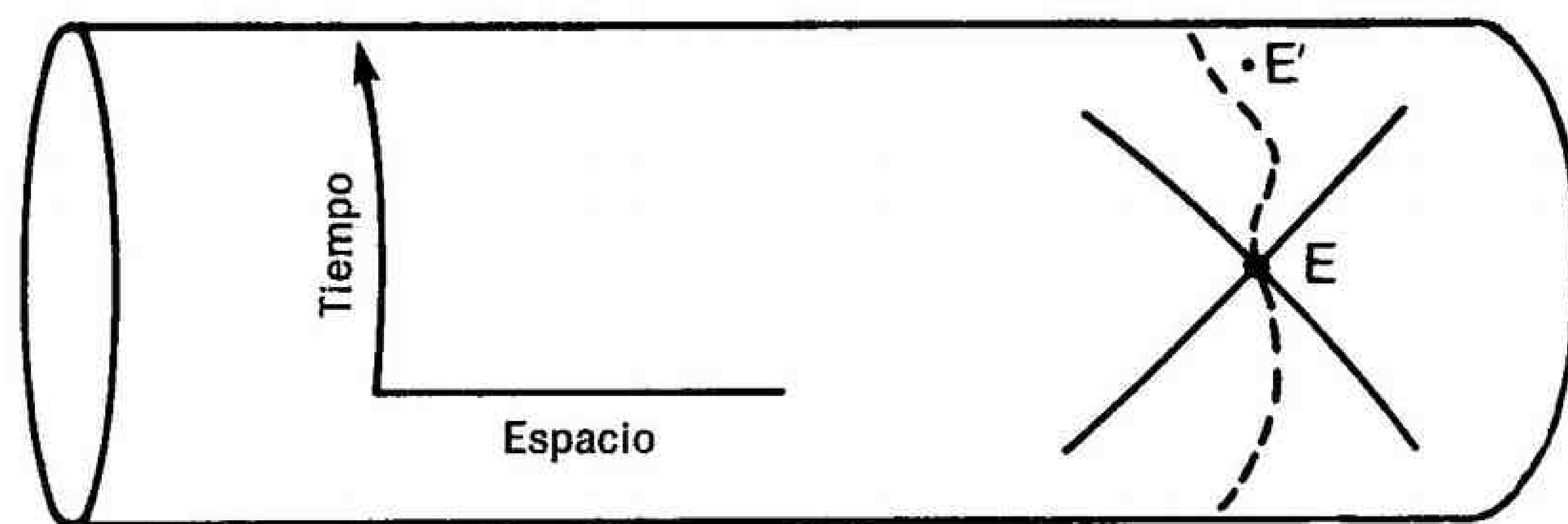


Fig. 24. *Tiempo cerrado.* Si el espacio-tiempo fuera como la superficie de este cilindro, el pasado sería también el futuro, y el tiempo sería de duración limitada. Un suceso como el E′ está en el interior del cono de luz futuro de E, pero si extendemos hacia atrás el cono pasado alrededor del cilindro, también incluirá a E′. (Para representar esta situación sólo hemos dibujado una dimension espacial, de manera que "cono" quiere decir dos líneas en forma de V.)

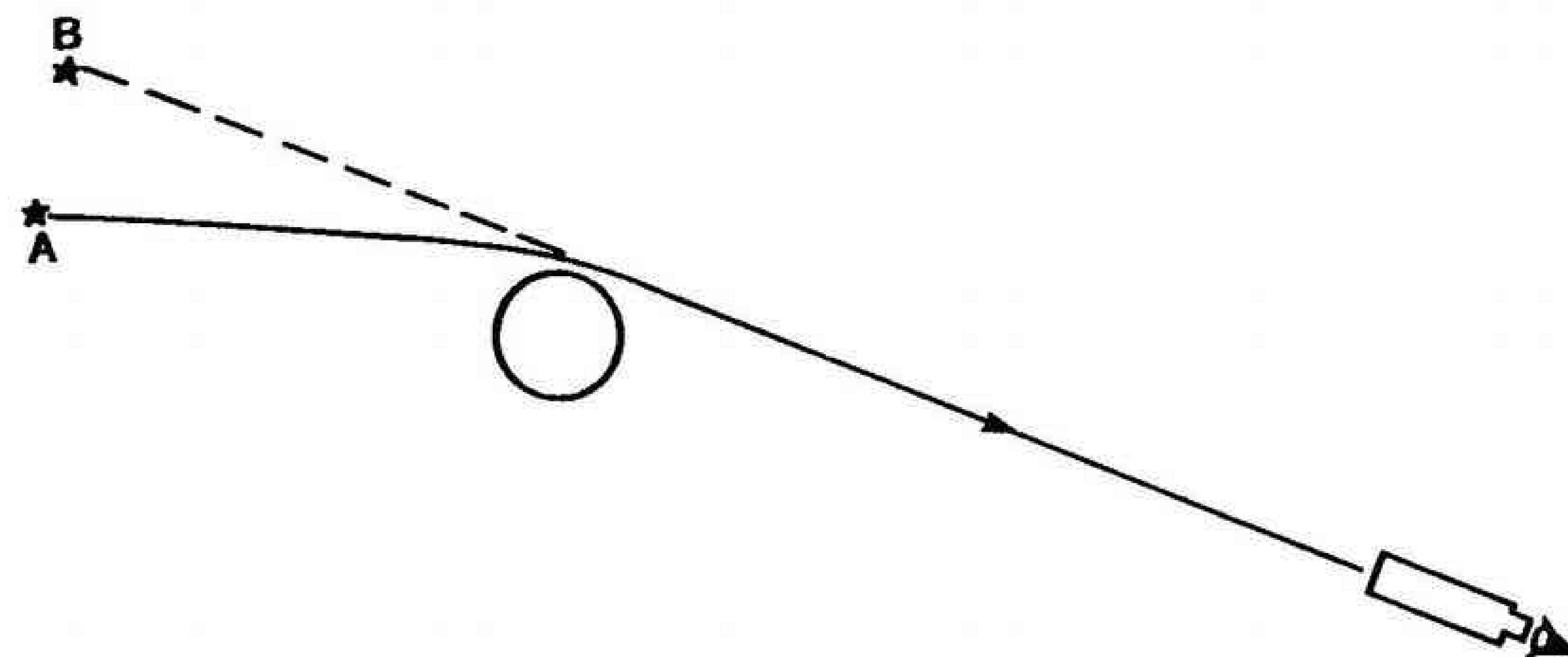


Fig. 25. La gravedad curva los rayos de luz provenientes de una estrella. Una estrella cuya posición real es A parece estar en B cuando se interpone el Sol. El efecto está muy exagerado en la figura. La observación se puede realizar durante un eclipse solar para evitar el resplandor del Sol.

como hemos dicho en el capítulo 1, la existencia de este efecto se puede comprobar midiendo cuidadosamente la posición de una estrella cuando el Sol está lejos de la línea de visión dirigida hacia ella, y viendo cómo varía esta posición al desplazarse el Sol, en su movimiento anual a través de las constelaciones del Zodíaco, hacia donde está situada la estrella sobre la esfera celeste. Hoy en día se puede comprobar esto utilizando el radar en lugar de la luz (todas las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz) haciendo rebotar pulsos de radar sobre otros planetas del sistema solar cuando en su órbita están situados en el punto más alejado del Sol.

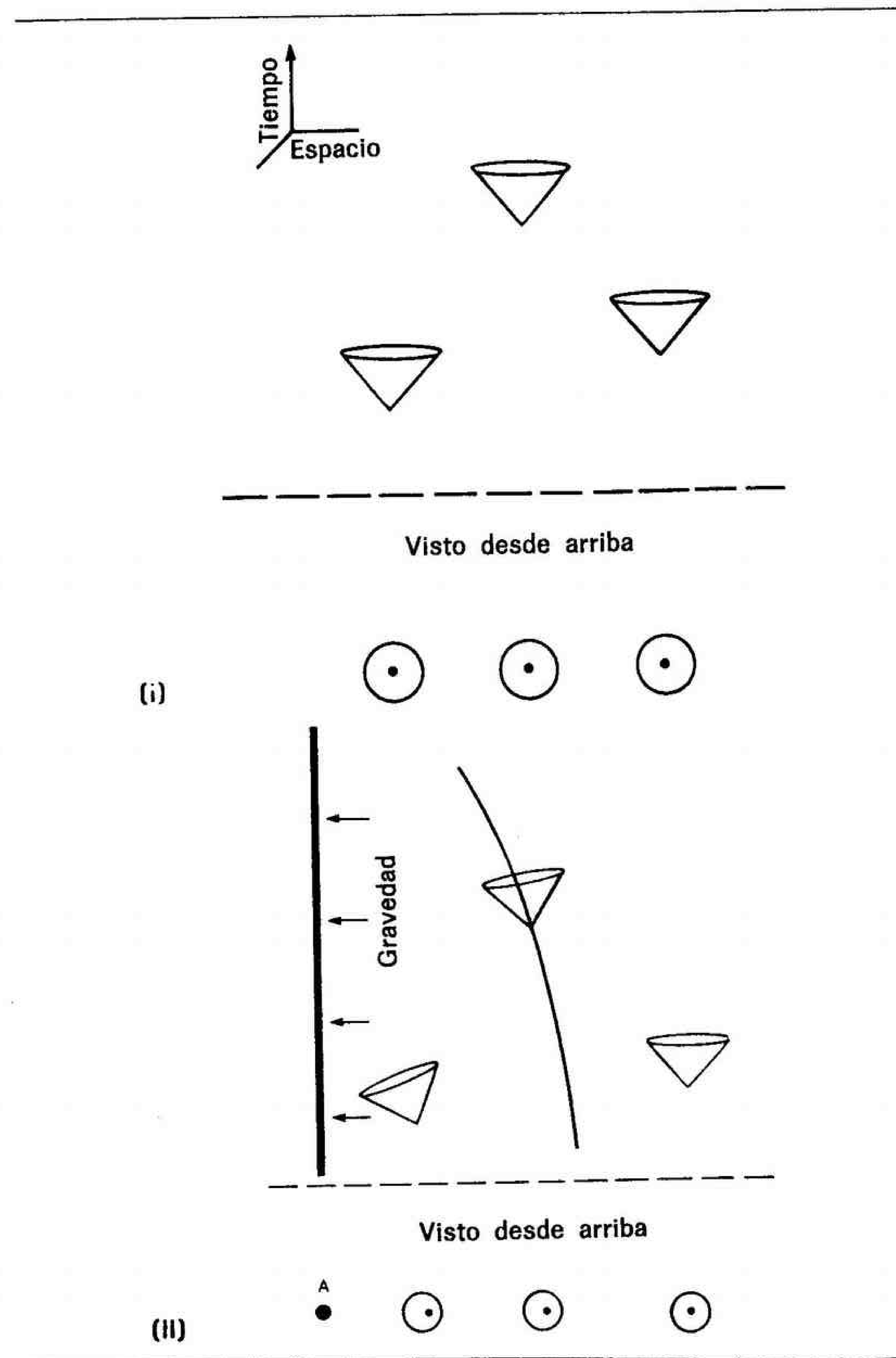
Otra forma en que la gravedad afecta a la luz está relacionada con la frecuencia de ésta. A medida que la luz sube desde el suelo se "cansa", es decir pierde energía, igual que un cuerpo material. Este agotamiento gravitatorio se manifiesta en una pérdida de frecuencia, en otras palabras, en un corrimiento del color de la luz hacia el rojo en el extremo del espectro. Ya hemos mencionado otro tipo de corrimiento hacia el rojo, el corrimiento Doppler originado por el alejamiento de una fuente de luz. El corrimiento hacia el rojo gravitatorio puede medirse directamente en el laboratorio lanzando hacia arriba desde una torre rayos gamma de frecuencia bien determinada. El efecto, aunque minúsculo en la Tierra, es, no obstante, medible.

Una forma alternativa de considerar estos efectos de la gravedad sobre la luz es en términos del espacio y del tiempo. La pérdida de frecuencia de la luz equivale a la aceleración del tiempo a grandes alturas sobre el suelo, efecto que puede verificarse colocando relojes en cohetes en vuelo y controlando su marcha con respecto a un reloj de referencia situado en la superficie de la Tierra. Este experimento lo realizaron R. F. C. Vessot y M. W. Levine del Harvard College y los Observatorios Smithsonian. Utilizaron un máser de hidrógeno, como reloj atómico muy estable y preciso, situado a bordo de un cohete Scout D que fue lanzado desde Wallops Island, Virginia, el 18 de junio de 1976. Calcularon los "tics" del máser del cohete respecto a dos másers situados en el suelo, utilizando un radio enlace muy preciso desde el suelo al cohete. Tal como se esperaba, el reloj del cohete corrió más deprisa a gran altura que los aparatos idénticos situados en Tierra.

Es importante resaltar que un observador situado a bordo del cohete no *sentiría* correr el tiempo más rápido, ya que sus procesos físicos y mentales quedarían igualmente afectados. Para él, los sucesos en la superficie de la Tierra parecen ir más lentos. En el caso de la Tierra este fenómeno es demasiado pequeño para que un ser humano se dé cuenta de él, pero veremos que existen objetos astronómicos extraordinarios para los cuales la variación temporal entre la superficie y un lugar distante es enorme.

¿Cómo podemos representar estas ideas en un diagrama espacio-tiempo? La curvatura de un rayo de luz por la gravedad la representaremos en este diagrama mediante una distorsión en las formas de los conos de luz. En el capítulo 1 se explicó cómo, según Einstein, la gravedad no debe considerarse como una fuerza sino como una distorsión de la geometría del espacio y del tiempo. En un espacio-tiempo curvado no es sorprendente que los rayos de luz se curven (como en el caso de la desviación por el Sol de los rayos de luz que provienen de una estrella) o se alarguen (como en el ex-

Fig. 26. Cuando un objeto masivo A (tal como una estrella) está presente, su gravedad arrastra a la luz hacia él. El efecto en nuestro diagrama de espacio-tiempo es la inclinación de los conos de luz en la dirección de A. Los conos más cercanos a A son los más afectados. Mirando los conos desde arriba vemos el borde como un circulo y su vértice como un punto. En (i) no hay gravedad y los puntos están en el centro de los circulos (conos superiores). En (ii) la inclinación de los conos causa un desplazamiento de los circulos. Esta distorsión equivale a una curvatura del espacio-tiempo.



perimento del corrimiento hacia el rojo antes mencionado). Podemos imaginar que esta distorsión de los conos de luz se debe a los bultos que causa la gravedad en el espacio-tiempo.

La figura 26(i) muestra varios conos de luz en ausencia de gravedad. En la figura 26(ii) se muestran los mismos conos cuando tenemos a la izquierda un gran objeto gravitante A, como por ejemplo una estrella (su línea de universo se representa mediante una línea vertical de trazo más fuerte). Como puede verse, el efecto de la gravedad inclina los conos un poco hacia la izquierda. La línea curvada es la línea de universo de un observador que cae libremente en el campo gravitatorio.

A veces es útil considerar estos diagramas vistos desde arriba. Cada cono se convierte entonces en un círculo con un punto que

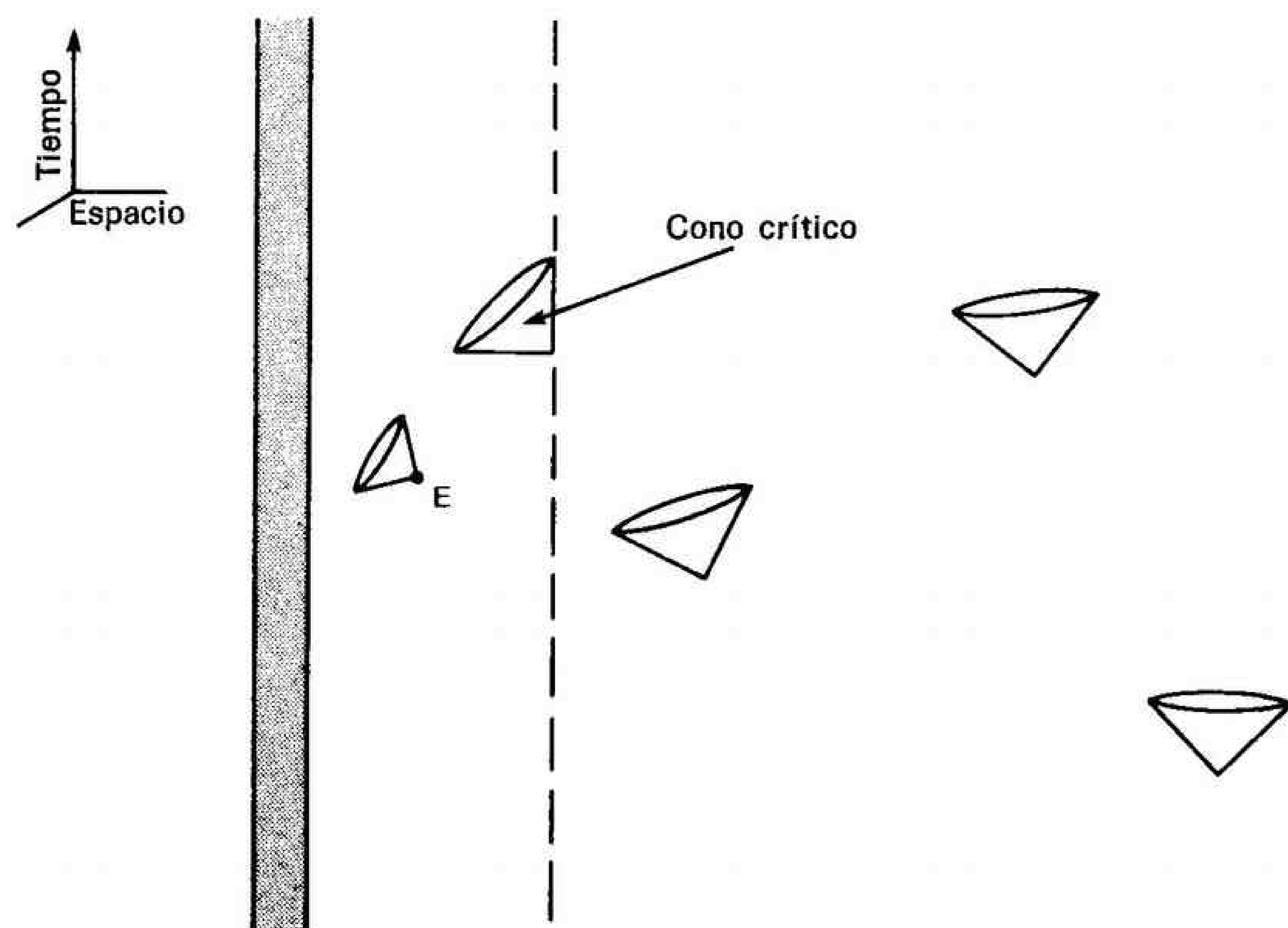


Fig. 27. Si la gravedad cerca de una estrella esférica (dibujada como un tubo sombreado) llega a ser suficientemente fuerte, puede inclinar totalmente a los conos de luz hacia el interior (hacia la estrella) antes que hacia arriba. La línea quebrada es el radio crítico de Schwarzschild, en el que el borde derecho del cono tiene una inclinación según la vertical. Un suceso como el E no puede ser observado desde el exterior del radio de Schwarzschild.

representa su vértice. Desde esta perspectiva el efecto del campo gravitatorio es tal que desplaza un poco los círculos hacia el centro gravitatorio, como si la luz fuera arrastrada hacia él. Estas figuras son totalmente equivalentes a las que dibujaríamos si para representar el espacio-tiempo curvado utilizáramos una hoja de papel curvada y distorsionada en lugar de la hoja plana de este libro.

Provistos con estas figuras examinemos el efecto de la gravedad alrededor de una estrella masiva. La figura 26(ii) muestra esta situación de dos maneras: representando los conos de luz lateralmente y vistos desde arriba. Cerca de la superficie de la estrella, la gravedad es muy fuerte y los conos de luz se inclinan mucho, pero más lejos de ella el efecto es menos acentuado. La magnitud de la gravedad, recordémoslo, crece de acuerdo con la ley del inverso del cuadrado de la distancia a medida que nos acercamos a la superficie.

Podríamos pensar en lo que ocurre si la estrella se contrae más aún, de forma que la gravedad cerca de la superficie crece todavía más. ¿Cuánto pueden llegar a inclinarse los conos de luz? Es posible calcular la inclinación para un cuerpo esférico, y estos cálculos muestran que una estrella de masa igual a la de nuestro Sol si se contrae a cerca de 1,5 km de radio produce un efecto extraño en el espacio-tiempo que la rodea. Este efecto se representa en la figura 27. Los conos de luz se han inclinado tanto que la superficie derecha del cono futuro corta a la vertical y se inclina hacia la estrella (es decir, hacia la izquierda). La figura 28 muestra el mismo fenómeno visto desde arriba. Por debajo de un radio crítico, llamado radio de Schwarzschild, en memoria del matemático alemán Karl Schwarzschild que estudió por vez primera la aplicación de la teoría general de la relatividad de Einstein para una estrella esférica, los círculos se desplazan por entero más allá de los puntos. ¿Qué significa esto?

Consideraremos un suceso particular E en el vértice de un cono de luz. El cono, recordémoslo, representa la historia del pulso de luz emitido por este suceso en todas direcciones. Desde la perspectiva círculo-punto, el círculo representa una esfera de luz que rodea al punto desde el cual fue emitida un poco antes. La esfera se expande gradualmente. En un espacio libre de gravedad esta esfera de luz en expansión estaría siempre centrada en el punto de emisión, pero la gravedad arrastrará a la esfera hacia un lado. Por debajo del radio de Schwarzschild este arrastre es tan fuerte que la luz, que normalmente se *alejaría* de la estrella, se ve forzada a moverse *hacia* ella. Claramente está ocurriendo algo extraordinario.

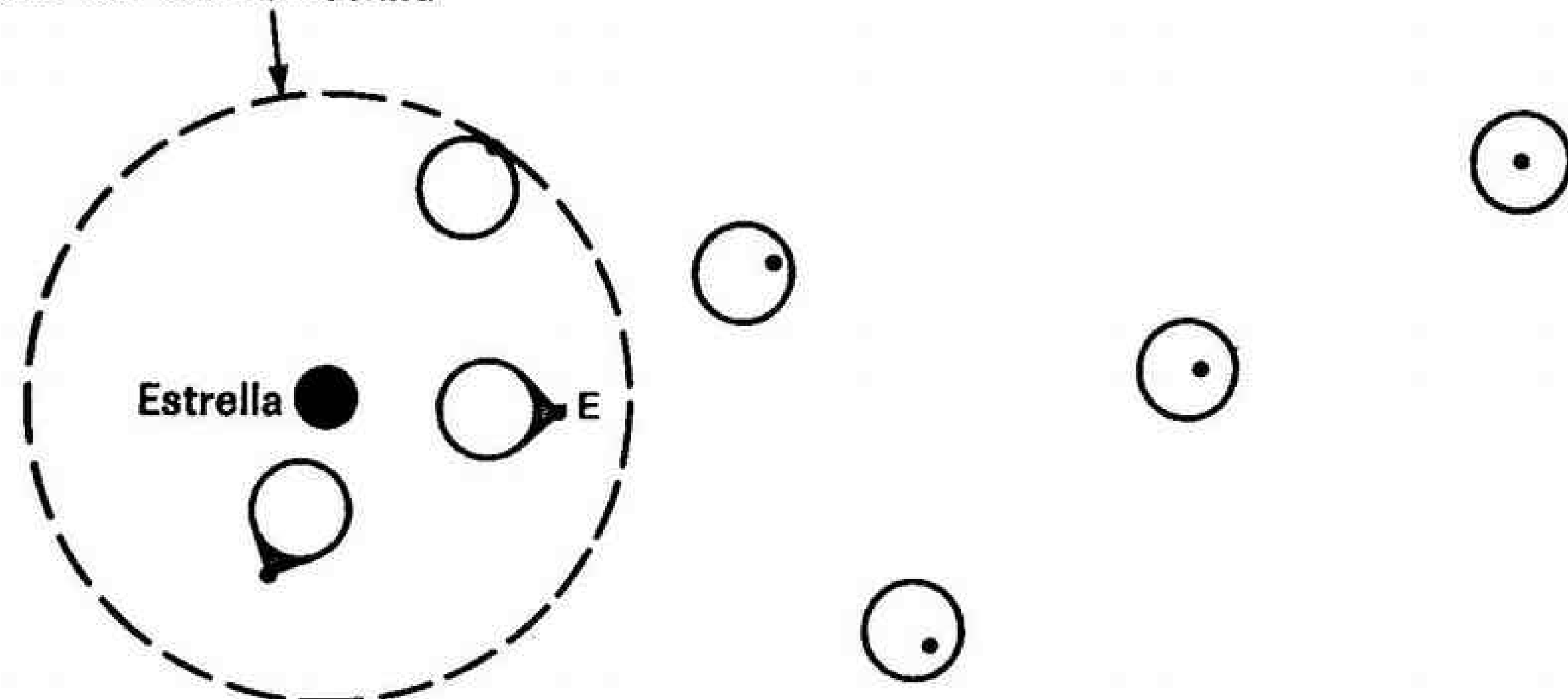
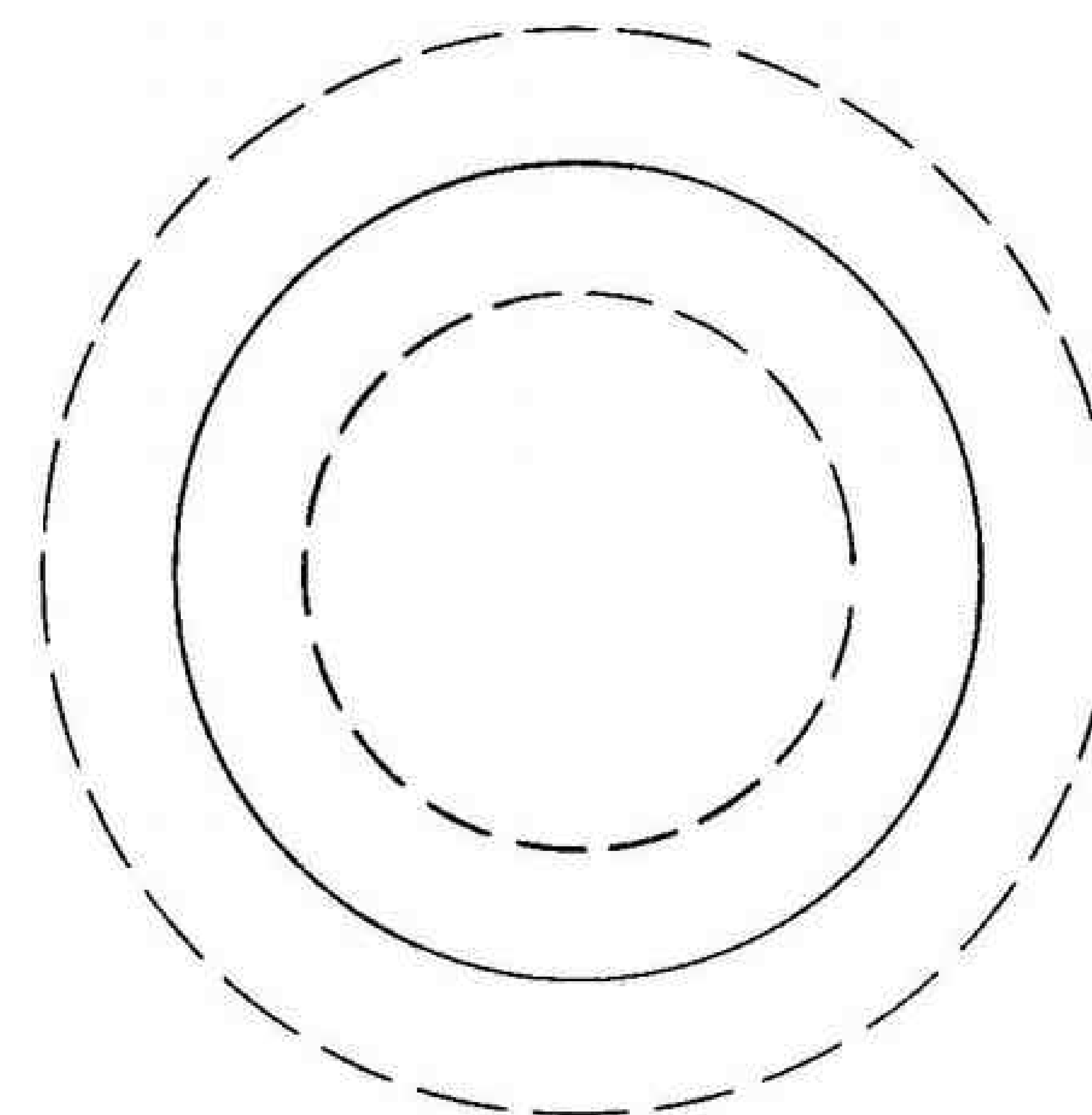


Fig. 28. La situación de la figura 27 vista desde arriba. Los lados de los conos más alejados de la estrella tratan de alejar la luz del centro gravitatorio, pero dentro del radio de Schwarzschild el efecto de arrastre de la gravedad es tan fuerte que incluso este borde del cono se inclina hacia adentro, arrastrando a la luz hacia la estrella. Entonces, un suceso tal como el E no puede enviar información hacia el exterior.

Este fenómeno es tan ajeno a la experiencia que vale la pena examinarlo bajo otro punto de vista. Imaginemos una esfera hueca de radio fijo y a la que de repente encedemos durante un instante. Un pulso esférico de luz se alejará mientras que otro se desplazará en el interior hacia el centro de la esfera. Este sencillo sistema se muestra en la figura 29(i), donde se representan mediante líneas quebradas las esferas que se iluminan un breve instante después de la emisión. Si la esfera hueca estuviera situada alrededor de una estrella compacta, por debajo del radio de Schwarzschild, el comportamiento de las esferas de luz sería sorprendentemente diferente. La esfera interior que se contrae seguiría encogiéndose hacia el centro como antes. Pero esta vez incluso la luz dirigida *hacia afuera* convergería también hacia el centro, como se muestra en la figura 29(ii). Ambas esferas de luz hacia el exterior y hacia el interior se contraen.

En lenguaje físico se describe a veces este extraordinario comportamiento de la luz dirigida hacia afuera diciendo que la gravedad cerca de una estrella compacta ha llegado a ser tan intensa que atrapa incluso a la luz –la entidad más rápida del Universo–. La posibilidad de que existieran en el Universo estrellas tan masivas que su gravedad atrapara incluso a su propia luz fue ya propuesta hace



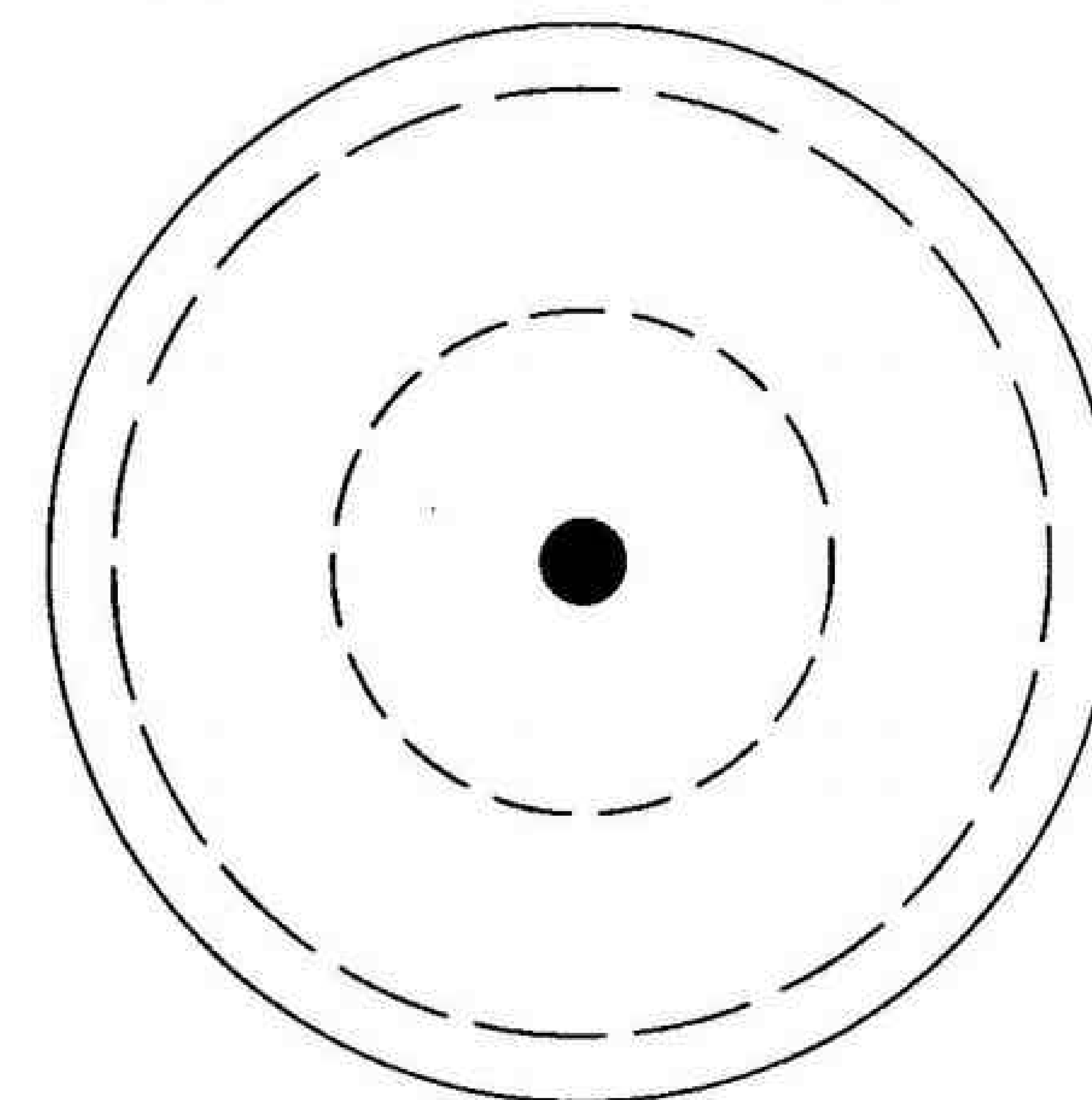


Fig. 29. *Pulsos de luz en una esfera hueca: (i)* La esfera hueca (línea continua) se enciende durante un instante. Un momento más tarde los pulsos esféricos de luz que ha emitido han llegado a las posiciones señaladas por las líneas quebradas. La esfera de luz exterior se expande, y la interior se contrae hacia el centro.*(ii)* Cuando la esfera hueca está encerrada dentro del radio de Schwarzschild de un cuerpo masivo (esfera negra), *las dos* esferas de luz se *contraen;* incluso el pulso dirigido hacia el exterior va hacia adentro. En consecuencia, la esfera hueca no podrá nunca ser vista desde el exterior.

unos doscientos años. Es útil considerar esta exótica situación por medio de una analogía.

Supóngase que representamos un pulso de luz por una bola y el efecto de la gravedad por una cinta elástica fija a un poste, como se encuentra a veces en algunos juegos infantiles. Si se estira la cinta y se lanza la bola hacia el poste, el efecto de la tensión elástica incrementa la velocidad de la bola. Pero si arrojamos ésta en dirección contraria, la fuerza elástica impide su alejamiento, reduciendo su velocidad de proyección. Si acortamos la cinta y la estiramos hasta el mismo lugar que antes, la tensión será mayor y se llegará a un punto crítico en el que la bola que lanzamos en dirección contraria será sobrepasada por la fuerza elástica y en lugar de alejarse del poste será arrebatada de la mano misma del que la lanza. Esto corresponde a la situación por debajo del radio de Schwarzschild, donde la gravedad atrapa a la luz dirigida hacia afuera.

Si la esfera hueca está situada exactamente en el radio de Schwarzschild, los rayos de luz lanzados hacia afuera permanecen estáticos, no van ni hacia afuera ni hacia adentro, sino que se quedan flotando cerca de la esfera hueca a una distancia fija del objeto central. En la figura 27 esto corresponde al borde exterior del llamado cono "crítico" colocado en posición perfectamente vertical. Sin embargo, no debe pensarse por ello que la velocidad de la luz, en sentido normal, se reduzca a cero en el radio de Schwarzschild. Es únicamente cuando vemos los rayos de luz dirigidos hacia afuera desde una gran distancia cuando parece que no avanzan. Si un observador visitara la región del radio de Schwarzschild no notaría nada fuera de lo normal, tal como, por ejemplo, una luz que se moviera lentamente. El motivo es que cualquier cuerpo material en esta zona se precipatará rápidamente hacia el interior, dejando a la luz dirigida hacia el exterior en su lucha por escapar hacia el infinito. Por lo tanto, desde el punto de vista del observador en caída, la luz parece comportarse con normalidad, es decir, viajar a la velocidad normal de 300.000 km por segundo con respecto a él.

Una consecuencia evidente del hecho de que incluso la luz dirigida hacia afuera sea arrastrada hacia el centro de la estrella es que ninguna luz podrá llegar al mundo exterior desde el interior del radio de Schwarzschild. En consecuencia, como no hay información que pueda salir de un suceso más rápidamente que la luz, el mundo exterior no puede tener conocimiento de los sucesos que ocurren por debajo del radio de Schwarzschild. Por lo tanto, la superficie esférica de este radio divide al espacio-tiempo en dos regiones distintas: los sucesos exteriores que podemos presenciar, si esperamos el tiempo suficiente, y los sucesos internos que quedan escondidos para siempre. En consecuencia, a la superficie esférica del radio de Schwarzschild se la denomina *horizonte de sucesos.* Al igual que el horizonte terrestre, su existencia no implica que no exista nada más allá –de hecho podemos ver los sucesos que allí ocurren desplazándonos más allá del horizonte–. Pero un observador que permanezca siempre fuera del horizonte de sucesos no puede conocer la región interior. Se puede considerar que el horizonte de sucesos está señalado por el último pulso de luz que puede alejarse tras muchísimo tiempo. Está formado por el borde exterior de los conos de luz inclinados exactamente en vertical en la figura 27. Dado que no podemos ver la región en el interior del horizonte, un objeto como éste parecería completamente negro, y por eso se le llama agujero negro. Los astrónomos creen que los agujeros negros existen en muchos lugares del Universo y en mi libro *El Universo desbocado** explico en detalle sus propiedades.

Aunque la discusión anterior corresponde al caso especial de una estrella esférica, los horizontes de sucesos se forman en circunstancias mucho más generales. En particular si la estrella no es totalmente esférica, y quizá en rotación, los principales detalles de la formación del agujero negro son los mismos. Cuando una estrella atravesando el horizonte de sucesos colapsa, el corrimiento gravitatorio hacia el rojo, que hemos discutido con anterioridad en este capítulo, cobra una gran importancia. La luz que abandona la superficie de la estrella tiene que trepar por un campo gravitatorio que se va haciendo más fuerte a medida que la estrella se va contrayendo. Para llegar a un observador lejano, la luz se va haciendo por consiguiente más y más roja. A medida que la superficie de la estrella se acerca al radio crítico en el que está a punto de atravesar el horizonte de sucesos, este corrimiento hacia el rojo se dispara sin límite. El color de la estrella se va debilitando y finalmente se hace negro, que es cuando el objeto se convierte en un agujero negro. En una estrella típica este apagón ocurre con extraordinaria rapidez.

De acuerdo con el esquema, que ya hemos discutido, de que un corrimiento hacia el rojo de la luz se puede interpretar en el sentido de que el tiempo corre más lentamente en la superficie de la estrella con respecto a un lugar lejano, el hecho de que el corrimiento crezca sin límite implica que el tiempo en la superficie de la estrella que colapsa se pulveriza literalmente hasta detenerse. En lo que respec-

* *Este libro también se publica en la colección Biblioteca Científica Salvat.*

ta al observador lejano, los sucesos en la estrella se congelan en el tiempo, y toda actividad queda en suspenso. No puede, sin embargo, ver esta inmovilidad porque la estrella se ha vuelto negra. En contraste, los sucesos vistos desde la estrella resultan muy diferentes. Un observador allí situado no notaría que el tiempo fuera más despacio. En la millonésima de segundo (en su sistema de referencia) que emplea en alcanzar el horizante de sucesos, en el exterior pasará toda una eternidad.

Una vez en el interior del horizonte de sucesos, ¿qué le ocurre a la estrella? De entrada, parece que el progresivo aplastamiento del material estelar producirá finalmente un conglomerado de materia tan comprimida –tan dura y densa– que la contracción se parará y el objeto se quedará con un radio fijo, aunque realmente pequeño. No obstante, hay una objeción muy seria a este supuesto. La superficie de la estrella, que está hecha de materia ordinaria, no puede sobrepasar la velocidad de la luz y por lo tanto debe permanecer en el interior de los conos de luz. Pero como puede verse inmediatamente en la figura 27, los conos de luz en el interior del horizonte de sucesos están extremadamente inclinados. Por lo tanto la línea de universo de la superficie de la estrella se ve forzada hacia el interior junto con la luz. También en la figura 29(ii) la superficie de la estrella *tiene que* permanecer entre dos esferas de luz (líneas quebradas). Pero *ambas* esferas se están contrayendo, y en consecuencia la superficie de la estrella también se contraerá. Está atrapada entre dos esferas que se encogen, como si estuviera encajada en un torno infinitamente poderoso, y no puede evitar el ser más y más aplastada progresivamente. (Por esta razón la esfera hueca de la figura 29 no podría estar hecha de materia ordinaria, ya que se colapsaría. Debe considerarse como una superficie esférica imaginaria más que como una superficie material.)

Cuanto más se contrae la estrella, más fuerte es el aplastamiento y los rayos de luz se inclinan más hacia adentro. La estrella se dispara en su ritmo de contracción. No hay ninguna fuerza en el Universo, por poderosa que sea, que pueda aguantar la estrella contra el propio peso inmenso. La gravedad de la estrella lo supera todo y hace que el volumen de espacio que ocupa la misma vaya disminuyendo a velocidad creciente.

¿Y qué ocurre entonces? Si el objeto es exactamente esférico, el progresivo y catastrófico colapso estrujará a toda la estrella en un simple punto matemático en el centro. (Así en las figuras 27-29 deberíamos pensar que el objeto central o "estrella" es un punto más

que un objeto esférico.) Si esto ocurre, la densidad del material crece sin límite y llega a hacerse infinita. Esto ya nos indica que hay algo que no funciona. Cuando se predice que una cantidad física medible es infinita solamente hay dos alternativas. O la teoría ha colapsado, o el mundo físico ha dejado de existir.

En el capítulo anterior se dieron una serie de ejemplos en los que los físicos descubrieron el infinito en sus ecuaciones. En el caso del colapso atómico, la vieja teoría se reemplazó por la nueva teoría cuántica para volver a las predicciones razonables. Aquí la labor no es tan fácil. Detener el colapso implicaría que el material de la estrella puede superar la velocidad de la luz, abriendo entonces la perspectiva de una anarquía causal en el interior del agujero negro, incluyendo el viaje al pasado con todas las consiguientes paradojas.

Si el inexorable aplastamiento no se detiene, entonces hay más cosas en juego que el simple destino de la estrella. La teoría de Einstein conecta la gravedad con la geometría del espacio y del tiempo. Hablando en términos generales, cuanto mayor es la gravedad, más se distorsiona o curva el espacio-tiempo. En el caso de una estrella esférica que se contrae a un simple punto, la gravedad en la superficie de la estrella se hace infinita (véase figura 1), lo cual implica que la curvatura del espacio-tiempo también se hace infinita en ese punto. Los físicos llaman a este fenómeno una singularidad del espacio-tiempo. ¿Que significa esto físicamente?

Una forma de imaginar una singularidad del espacio-tiempo es por analogía con la superficie curvada tipo cono, como la de la figura 30. Cerca de la base del cono, la curvatura de la superficie es bastante ligera, pero a medida que vamos subiendo hacia el vértice la superficie se curva más y más, hasta que en la punta del cono la curvatura se hace infinitamente grande (una singularidad). El cono no se puede prolongar más allá de este punto. Un camino que lleve hacia el vértice (línea quebrada) no puede seguir subiendo indefinidamente. Cuando da con la singularidad, la superficie se interrumpe. Análogamente, una línea de universo en el espacio-tiempo cuando se hunde en una singularidad ya no puede volver atrás: el espacio-tiempo "se interrumpe".

Ciertamente hay en la ciencia pocas predicciones tan extrañas como ésta. El fin del espacio-tiempo significa el final del Universo físico, al menos tal y como nosotros lo entendemos. Lo que implica en la práctica un cese brusco de toda existencia se anlizará en el capítulo 7. Simplemente señalaremos aquí que si una estrella llega en su colapso a la singularidad del espacio-tiempo atravesará el

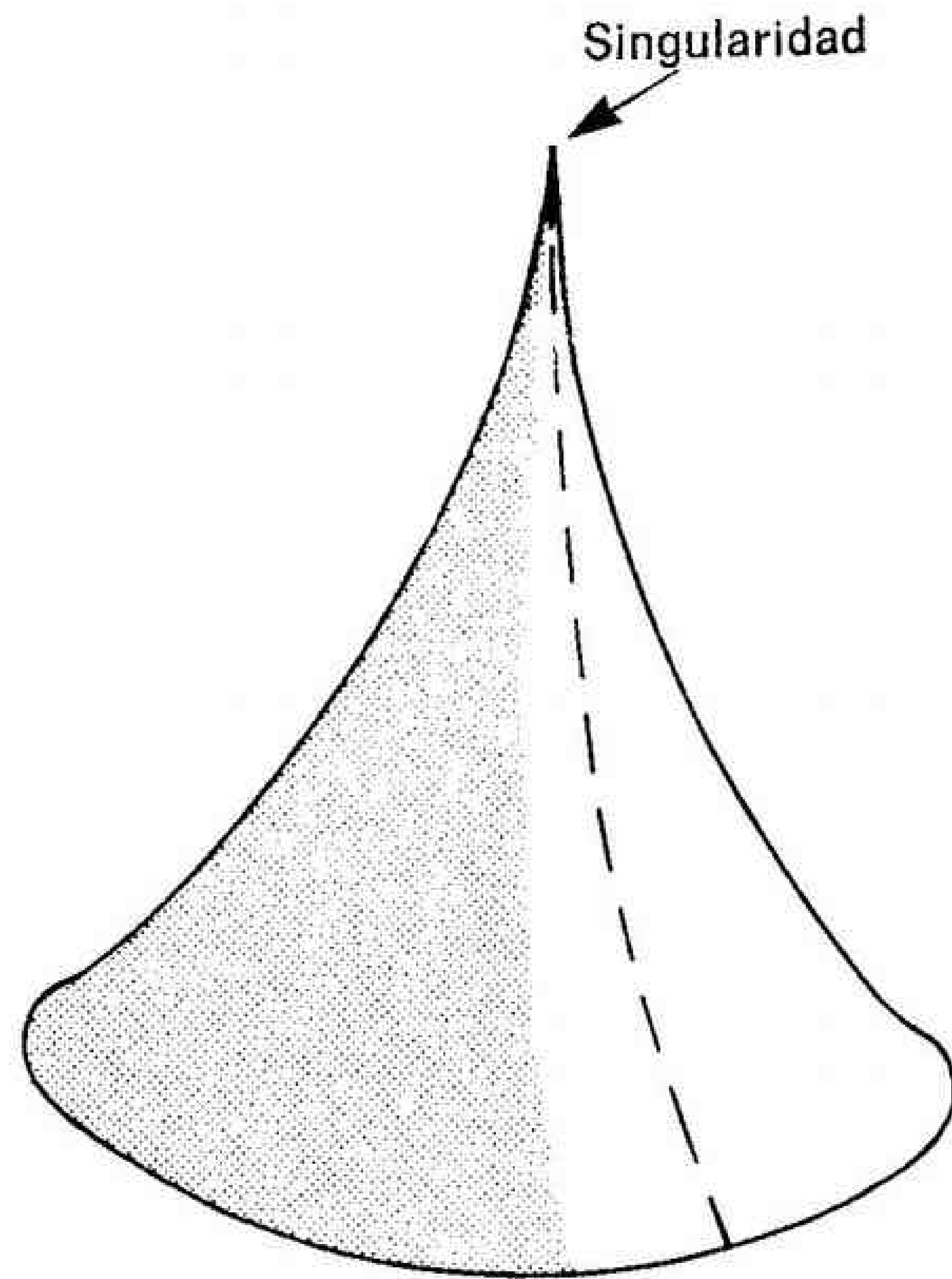


Fig. 30. El espacio-tiempo (la superficie) se curva progresivamente más hasta que se reduce totalmente a un punto y se detiene. Un ávido observador (linea quebrada) que explore cerca de la punta corre el riesgo de desaparecer para siempre en el final, nunca podrá volver. La singularidad en la punta representa un limite del espacio y del tiempo.

borde del mundo físico y no volverá jamás. En tal caso el objeto que colapsa formando el agujero negro deja de existir de repente tras la fugaz duración del colapso. Esta conclusión es tan desagradable que los físicos se han resistido durante mucho tiempo a creer en ella.

Una vía de escape podría ser el cuestionar la suposición de una esfericidad exacta. Evidentemente ninguna estrella puede ser *exactamente* esférica, y sin esta simetría no está claro que toda la estrella colapse a un mismo punto. Para entender mejor esto imaginemos que la estrella consiste en una bola de miles de millones de partículas puntuales. A medida que la bola colapsa, cada partícula cae radialmente hacia el centro exacto de la bola. Obviamente, dado este alto grado de simetría, todas las partículas llegarían al mismo sitio, es decir al centro, y la densidad se haría infinita. Si, por

otro lado, el sistema no fuera exactamente esférico, entonces las partículas caerían hacia lugares ligeramente diferentes y no se "encontrarían" nunca unas con otras. ¿Pero a dónde van? Parece que deberían precipitarse directamente hacia el otro lado, de forma que la bola en su colapso rebotaría al llegar a un radio muy pequeño y se expandiría otra vez. Sin embargo, no puede volver a nuestro Universo, ya que está atrapada en el interior del agujero negro por el horizonte de sucesos. El horizonte de sucesos representa, recordémoslo, una superficie en el espacio, en la que, desde el punto de vista de un observador lejano, el tiempo se detiene. Así, la implosión de la estrella, aunque sólo tarda un microsegundo de tiempo de la estrella (es decir, en el sistema de referencia de la misma), tarda una cantidad infinita de tiempo vista por el observador lejano. En consecuencia, si la estrella en colapso rebotara y volviera a nuestro Universo, la veríamos aparecer antes de que hubiera colapsado a través del horizonte de sucesos, lo cual es absurdo.

Se han propuesto tres alternativas. La primera es que la estrella rebota hacia otra parte del Universo, y quizás reaparece en el espacio más allá en alguna lejana galaxia. También esta idea parece implicar el riesgo de paradojas temporales, y no se toma muy en consideración. La segunda es que la estrella aparece en un Universo completamente diferente –otro espacio y tiempo coexistente en paralelo con el nuestro y que no se relaciona con nuestro Universo hasta que la estrella colapsa–. La tercera, y más incómoda, es que a pesar de la forma más complicada de una estrella no esférica en colapso, toda o parte de la estrella da con una singularidad y deja de existir.

La estrella podría llegar a tener una densidad infinita incluso sin colapsar a un simple punto. Por ejemplo, podría llegar a aplanarse mucho, como una galleta, y contraerse hasta un espesor cero. O también estirarse en forma de cigarro muy fino que se contraería hasta una línea de densidad infinita y espesor cero. Es evidente que estas formas son simplificaciones extremadas de un colapso real y también son posibles formas mucho más complicadas que pueden ser infinitamente densas.

Hace unos quince años muchos físicos creían que en una estrella en colapso real, las desviaciones de una simetría esférica permitirían que la estrella evitara el llegar a una situación de densidad infinita. Y se creía además que, en estas circunstancias, el espacio-tiempo podría evitar también el alcanzar la singularidad. Entonces entró en escena Roger Penrose, un brillante físico matemático que

trabajaba en el Birkbeck College de la Universidad de Londres. En 1965 Penrose demostró un resultado de implicaciones asombrosas, y abrió un capítulo completamente nuevo de la física. Probó que incluso si en su colapso la estrella evita una situación de densidad infinita, el espacio-tiempo no puede evitar el llegar de una forma u otra a la singularidad. El teorema de Penrose y los trabajos subsiguientes anuncian una terrible y aparentemente inevitable crisis de toda la naturaleza.

4. Hacia el borde del infinito

El descubrimiento de las singularidades del espacio-tiempo fue un acontecimiento capital en la historia de la ciencia. En 1915 Einstein liberó al espacio y al tiempo de los requisitos de rigidez inmóvil que le habían impuesto Aristóteles y Newton. Como resultado, los físicos elaboraron un espacio-tiempo cambiante y en movimiento, un sistema geométrico que podía evolucionar y transformarse de infinidad de maneras. Pero el precio impuesto al dotar al espacio-tiempo de vida y actividad es que, cuando la gravedad se descontrola, el espacio-tiempo se destruye y deja de existir en la singularidad.

Para saber en qué circunstancias se produce una singularidad es vital que entendamos exactamente lo que es ésta. La importancia del teorema de Penrose sobre las singularidades radica en que demuestra que éstas no son simples sutilezas matemáticas originadas por una idealización extremada. El teorema indica que las singularidades no son un final del colapso gravitatorio de un tipo muy especial sino que constituyen una característica casi inevitable de un Cosmos que funciona gravitatoriamente.

El propio teorema gira en torno a la existencia del extraño fenómeno descrito en el capítulo anterior, es decir, que en el interior de un agujero negro la gravedad es tan grande que incluso los rayos de luz dirigidos hacia el exterior son arrastrados hacia dentro. Penrose consideró este fenómeno sin necesidad de suponer la existencia de una estrella perfectamente esférica en colapso.

Supongamos que debido a la fuerte gravedad en alguna región del espacio-tiempo, los rayos de luz sufren este arrastre hacia adentro. Podemos imaginar una superficie que rodea a esta región –no es necesario que sea una superficie esférica como en el capítulo an-

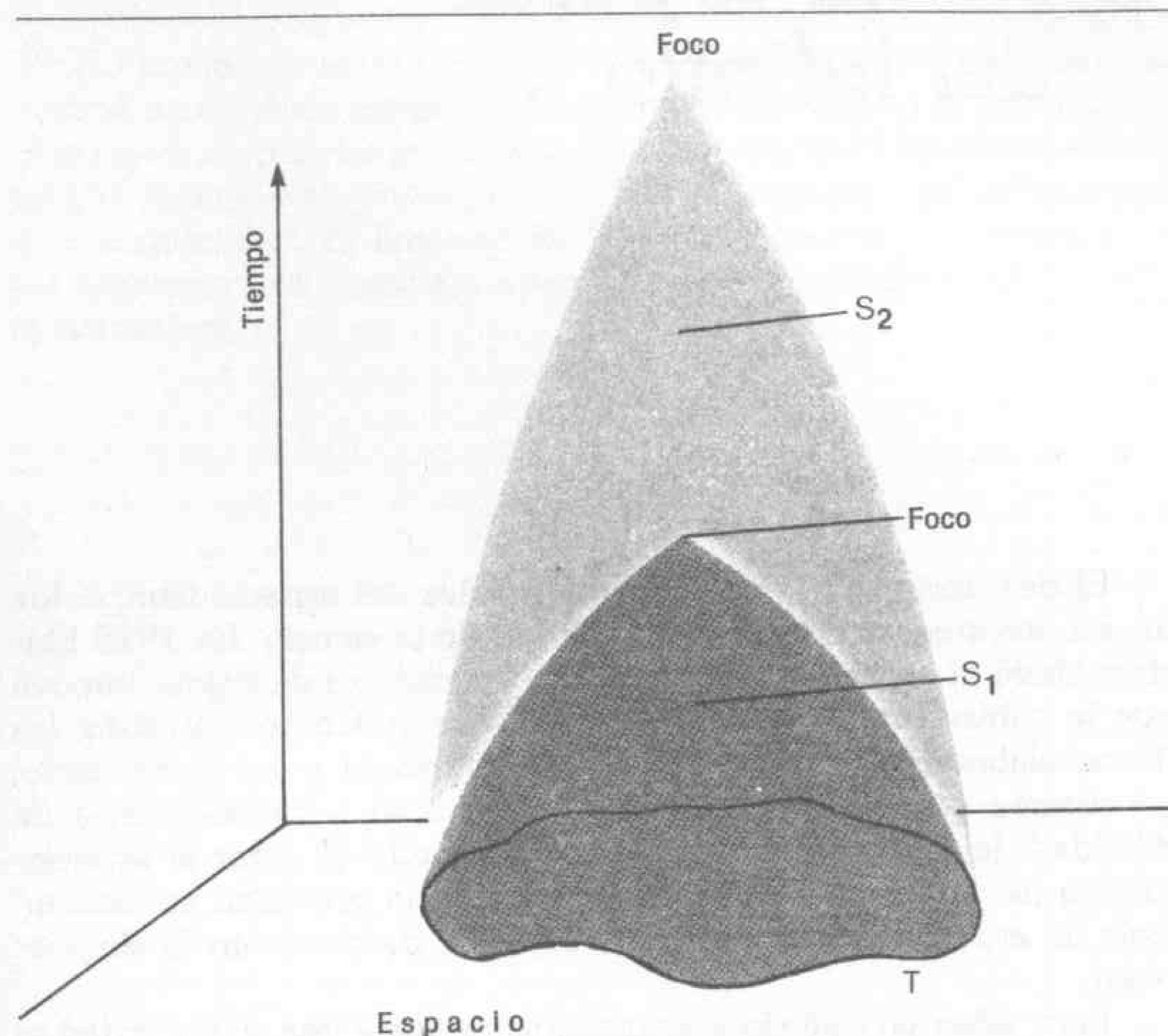


Fig. 31. *Luz atrapada.* El anillo ondulado T representa una superficie bidimensional cerrada en el espacio, la cual emite luz. La luz dirigida hacia adentro cae hacia el foco por la superficie cuasi-cónica S_1, y la luz dirigida hacia afuera también cae hacia el foco por S_2. En consecuencia, estas superficies de luz cierran completamente la región del espacio-tiempo entre S_1 y S_2.

terior, pero sí que tenga al menos la misma topología que una esfera– en la cual la luz dirigida hacia el exterior es succionada hacia el interior. Para aclarar la idea, en la figura 31 se representa un diagrama de espacio-tiempo de esta situación. El tiempo corre verticalmente, y el espacio tridimensional se representa mediante secciones horizontales bidimensionales. El anillo ondulado señalado con una T representa una superficie cerrada que rodea a la región de gravedad fuerte. La luz emitida hacia adentro de esta superficie se dirige rápidamente hacia el centro de la región, aunque no necesariamente hacia un punto exacto, ya que no es imprescindible que el sistema sea esférico. Estos rayos de luz son representados en el diagrama por la corta superficie cuasi-cónica S_1. El sombreado de S_1 se puede considerar como las trayectorias de los pulsos de luz que salen de los puntos de T y se precipitan hacia el interior de la región de fuerte gravedad. Aunque no es necesario que la superficie S_1 se afile en un punto, los rayos de luz se cruzan unos con otros de forma compleja formando una superficie continua, sin agujeros.

Los rayos de luz dirigidos hacia afuera se comportan de forma similar. En lugar de alejarse de la superficie T son arrebatados hacia el interior, hacia el centro gravitatorio, de la misma forma que la bola unida a una cinta elástica que hemos descrito en el capítulo 3. Estos rayos de luz están sobre la superficie S_2, otra estructura cuasi-cónica situada por fuera y por encima de S_1 en la figura 31. De nuevo la luz se concentra hacia el interior, no necesariamente hacia un único punto, pero ciertamente los rayos de luz se cruzarán unos con otros y cerrarán la superficie S_2, sin dejar agujeros. La luz está claramente atrapada por la gravedad, y por este motivo Penrose llama a T una *superficie atrapada.*

Hasta ahora no hemos dicho nada de una estrella en colapso, ni necesitamos determinar esta cuestión; el teorema es muy general. Pero, por razones de claridad, supongamos que el fenómeno de concentración que se muestra en la figura 31 se debe al colapso de una estrella, y así dibujaremos también la estrella en el diagrama. Esto se representa en la figura 32. El material de la estrella, que no puede ir más rápido que la luz, está obligado a permanecer entre los dos conos S_1 y S_2 y está por tanto atrapado; no puede escapar de esta región cerrada.

Llegado este punto empezamos a ver la importancia de la sencilla observación de que las superficies de luz S_1 y S_2 no tiene agujeros. Estas superficies juntas encierran completamente la región del espacio-tiempo de la cual tiene que contraerse la estrella. En lenguaje técnico, las superficies de luz S_1 y S_2 consideradas en conjunto parecen formar una sola unión y, por consiguiente, tener la topología de una esfera (aunque la *forma* sea más bien la de dos conos encajados uno en el interior del otro). La estrella, atrapada en esta región cerrada, no puede escapar, incluso si *no* se contrae en su totalidad hasta un punto singular de densidad infinita.

Penrose se dio cuenta de que hay algo realmente curioso en el hecho de que S_1 y S_2 tengan la topología de una esfera. (Desde luego en nuestro diagrama, en el que hemos suprimido una de las dimensiones espaciales, la topología parece realmente la de una es-

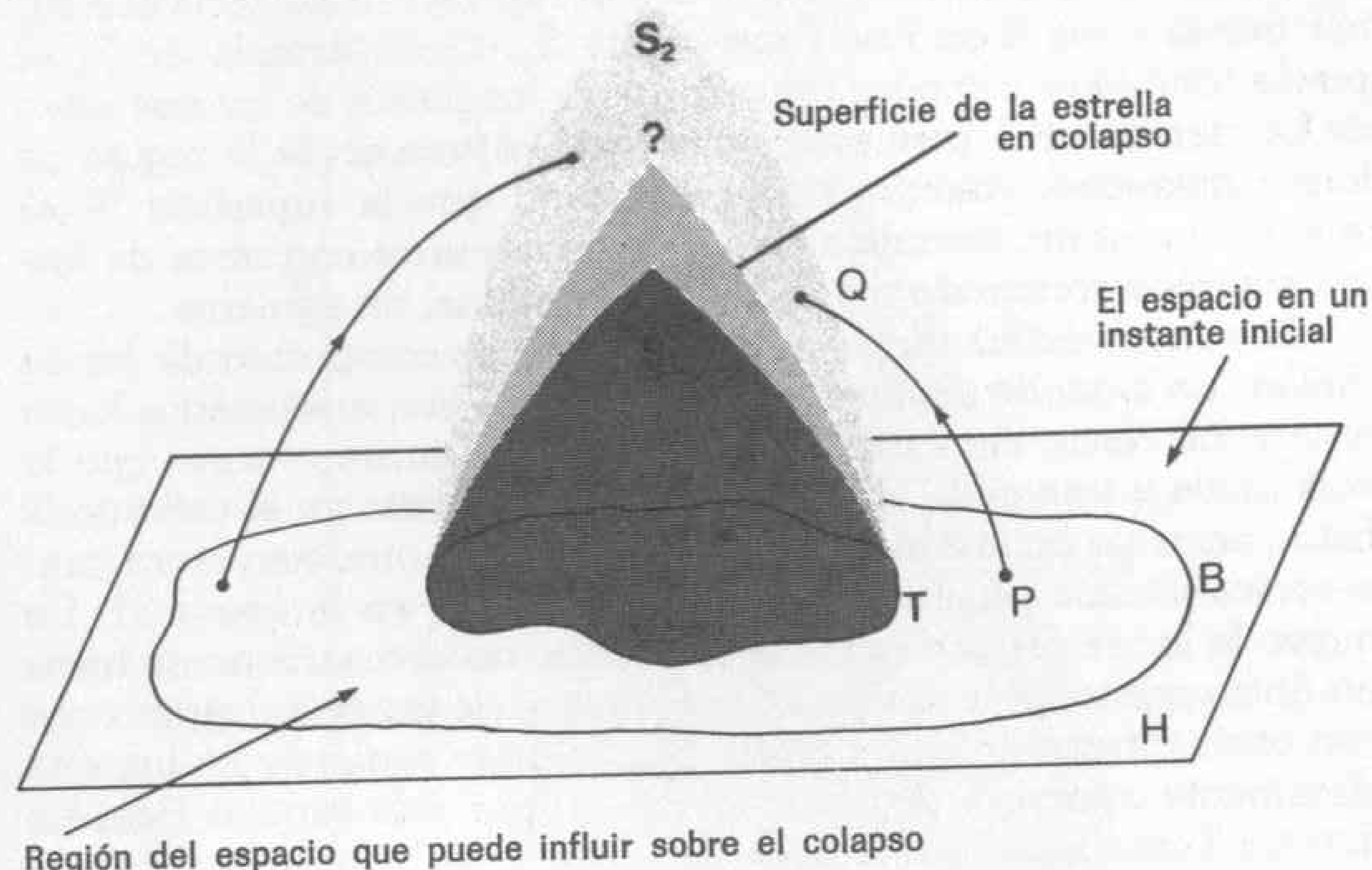


Fig. 32. *La crisis del espacio-tiempo.* Todo lo que ocurre en el interior o sobre la superficie de luz en colapso S_2, queda determinado por las influencias originadas en puntos de la región de espacio limitada por B. Pero S_2 y S_1 en conjunto no tienen un límite (forman una superficie cerrada). ¿Dónde está, pues, la imagen de B sobre la superficie de luz? Es evidente que algo extraordinario le ocurre a la topología del espacio-tiempo.

fera. En el espacio-tiempo real, en el que hay una dimensión adicional, las "superficies" de luz S_1 y S_2 son en realidad volúmenes tridimensionales. (Sin embargo, y para facilitar nuestra explicación, continuaremos hablando de superficies y diciendo que la topología de S_1 y S_2 es la de una superficie esférica.) Si dirigimos nuestra atención hacia la región del espacio-tiempo que está en la base de la figura 32, región que representa una época menos conflictiva antes de que la estrella haya iniciado su caída hacia el olvido, podemos representar a todo el Universo en un instante determinado de tiempo por una sección horizontal H, que se extiende sin fin en todas direcciones, es decir hacia el espacio infinito. De acuerdo con ideas muy sencillas sobre causalidad, todo lo que ocurra a partir de esta época inicial debe estar predeterminado por lo que ocurre en ese instante, ya que todas las influencias físicas por encima de la sección H, o bien atraviesan H o son causadas por sucesos de H. En particular todos los detalles del posterior colapso gravitatorio, incluyendo el curioso agrupamiento de los rayos de luz en superficies cuasi-cónicas, están completamente determinados por lo que ocurre en H.

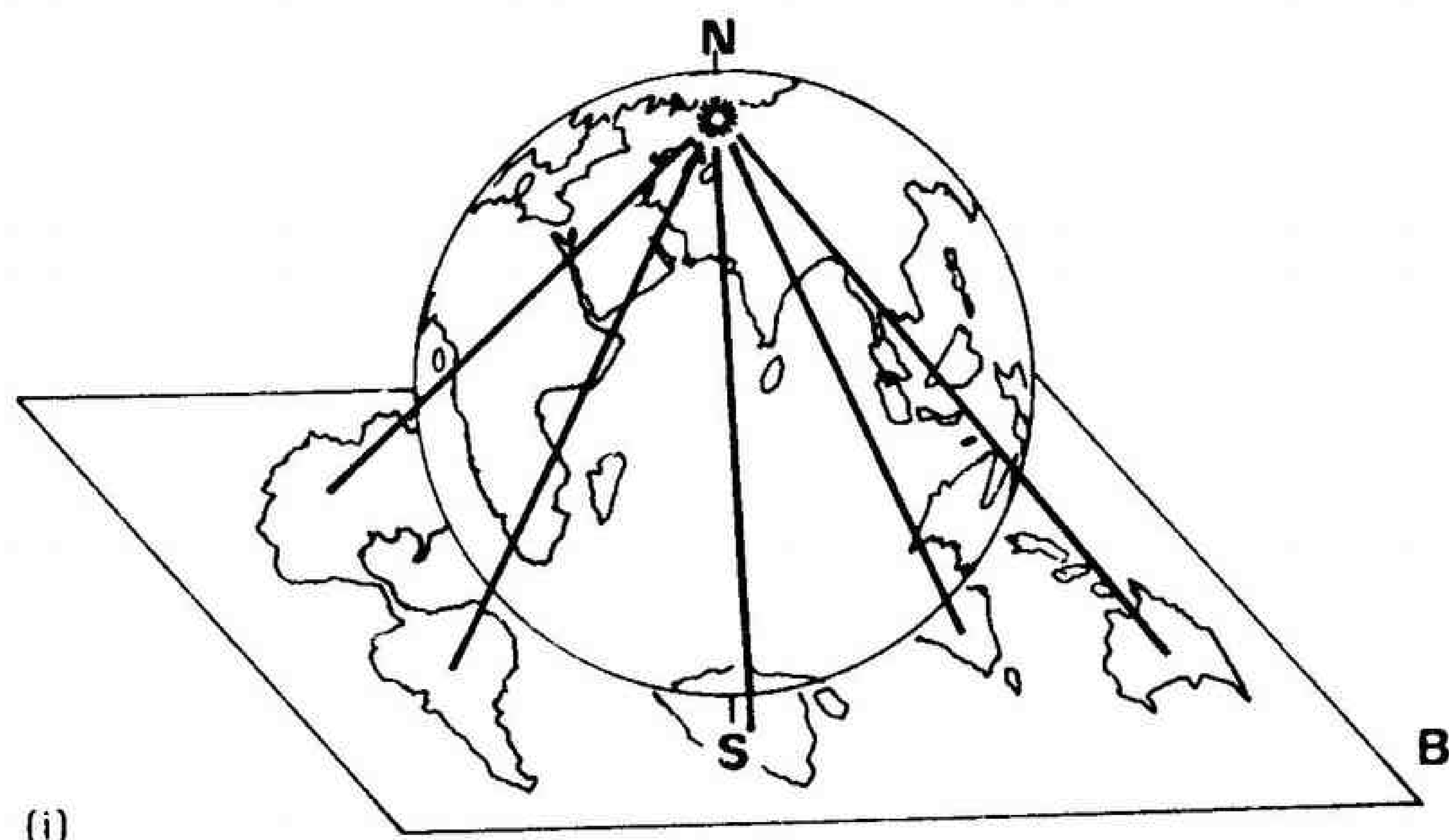
La característica central del teorema de Penrose es la observación de que si bien todos los sucesos de S_1 y S_2 son causados por los correspondientes sucesos de H, la topología de S_1 y S_2 es completamente diferente de la de H, siendo la primera la de una esfera y la segunda la de una hoja plana infinita. Esta incompatibilidad topológica revela que algo ha ido mal en la región del espacio-tiempo correspondiente al futuro de H.

Vale la pena examinar en detalle este punto, aunque difícil, crucial. Los sucesos que ocurren en H, muy lejos de la estrella en colapso, no pueden influir en lo que ocurre durante el propio colapso, ya que no hay tiempo suficiente para que sus señales se propaguen hasta la región donde ocurre el colapso, incluso a la velocidad de la luz. Dado que ninguna influencia puede superar esta velocidad, podemos representar un límite (denominado B en el diagrama) en H que encierre a todos los sucesos de H que puedan ejercer alguna influencia en el colapso gravitatorio de la estrella, incluso viajando a la velocidad de la luz. Podemos imaginar las señales e influencias saliendo de esta región cerrada de H y cayendo hacia la estrella. En la figura 32 hemos representado las líneas de universo de dos de estas influencias; podrían ser partículas materiales, fotones o cualquier otra clase de influencia física. Por ejemplo, el suceso P enviará influencias hacia la región del colapso y determinará, junto con otros sucesos, lo que ocurre en Q situado sobre S_2.

Se puede apreciar fácilmente que cada punto de las superficies de luz S_1 y S_2 puede remontarse a alguna influencia casual de la región de H encerrada por B. Pero esto es absurdo, ya que no hay *ningún límite* en S_1 o en S_2; la superficie de luz tiene la topología ilimitada de una esfera.

Este rompecabezas recuerda un problema de geometría más familiar relacionado con las proyecciones geométricas. La Tierra tiene una topología esférica, pero un mapa es una hoja, como H. Todos los mapas tienen bordes, es decir límites, si bien no hay ningún límite en la superficie de la Tierra. El cartógrafo tiene que cortar la proyección por algún sitio, normalmente por el Ártico o el Antártico. No hay forma alguna de cartografiar la superficie continua de una esfera en una hoja abierta de papel.

La figura 33(i) y (ii) ilustra detalladamente este punto. Supongamos que tenemos un globo translúcido con los continentes pintados



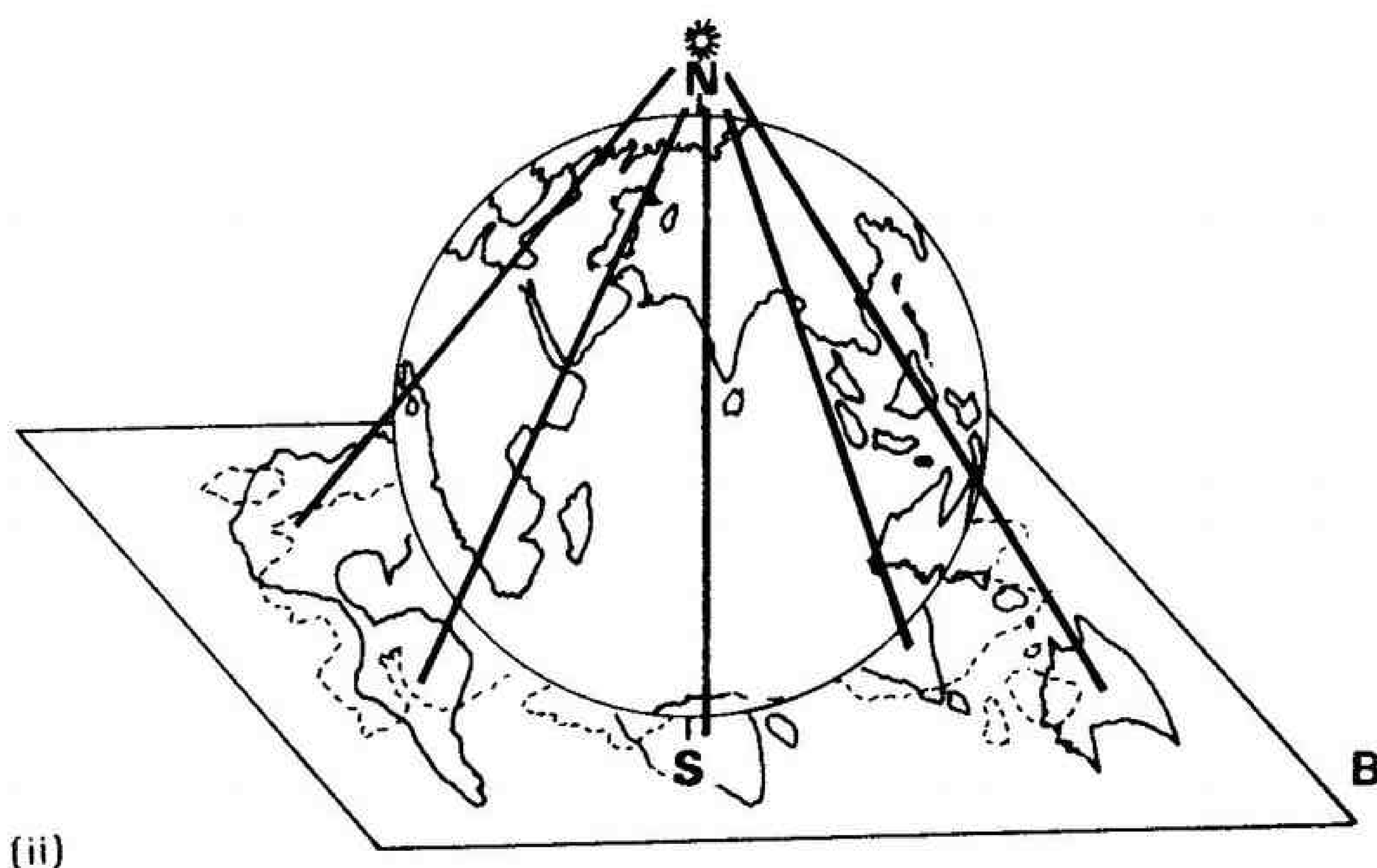
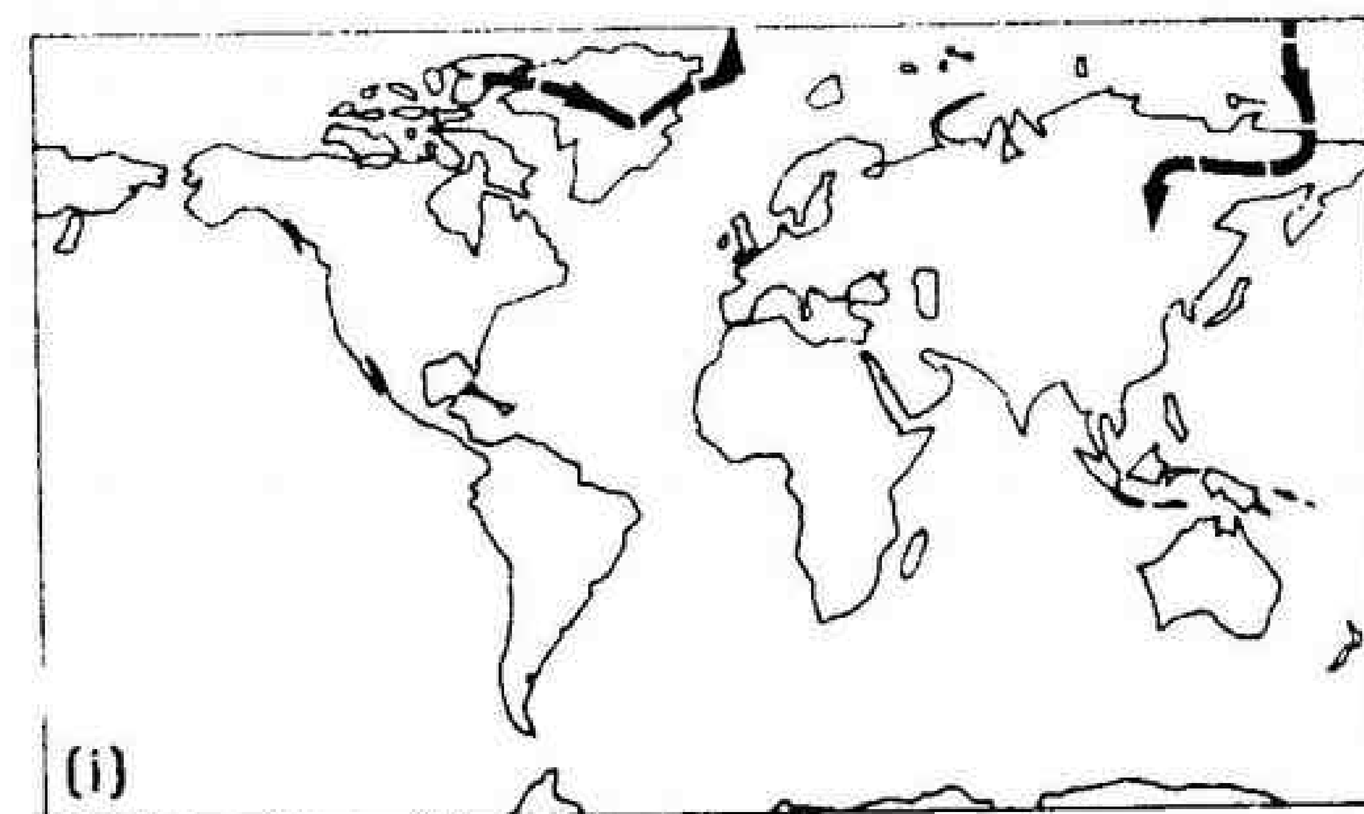


Fig. 33. *El rompecabezas del cartógrafo.* No hay forma de proyectar todo el globo sobre una hoja de papel con un límite B sin superponer países. *(i)* Cuando la luz se coloca dentro del globo algunas imágenes cercanas al Polo Norte se pierden en el mapa. *(ii)* Cuando la luz está fuera del globo las imágenes se superponen, ya que cada rayo de luz atraviesa dos veces la superficie del globo.

de algún color sobre su superficie. Suspendamos el globo sobre una hoja plana y blanca sobre la que queremos representar el mapa. Podemos exponer físicamente una reproducción gráfica proyectando literalmente las imágenes de los continentes sobre la hoja de papel mediante una luz. Para esto necesitamos una fuente puntual de luz que, situada cerca de la superficie de la esfera, proyecta una imagen, o una sombra, sobre la hoja.

Si colocamos la luz en el interior de la esfera, como en la figura 33(i), parte de la imagen se proyectará hacia arriba, y no intersectará al mapa. Para obtener la proyección de toda la esfera sobre el mapa debemos situar la luz por encima, como se muestra en la figura 33(ii). Sin embargo, aquí se presenta un problema, ya que las imágenes de los puntos cercanos al Polo Norte quedarán evidentemente superpuestas sobre las correspondientes al Polo Sur. Cada rayo de luz atraviesa dos veces la superficie de la esfera. Incluso empleando sofisticadas lentes y espejos para curvar los rayos de luz, no hay manera de evitar este fundamental obstáculo *topológico*. Utilizando el lenguaje técnico empleado en el capítulo 2, diremos que no hay forma de obtener una correspondencia, uno a uno, de la esfera con una hoja limitada.

Para que no le queden todavía al lector dudas sobre este punto, describiremos otro aspecto de la dificultad. La figura 34 (i) muestra un mapamundi ordinario en la proyección de Mercator. Consideremos la trayectoria de un explorador ártico que sale del Canadá. En el mapa esta trayectoria se acerca al borde superior que representa al Polo Norte. Cuando llega al borde hay dos posibilidades: o bien la



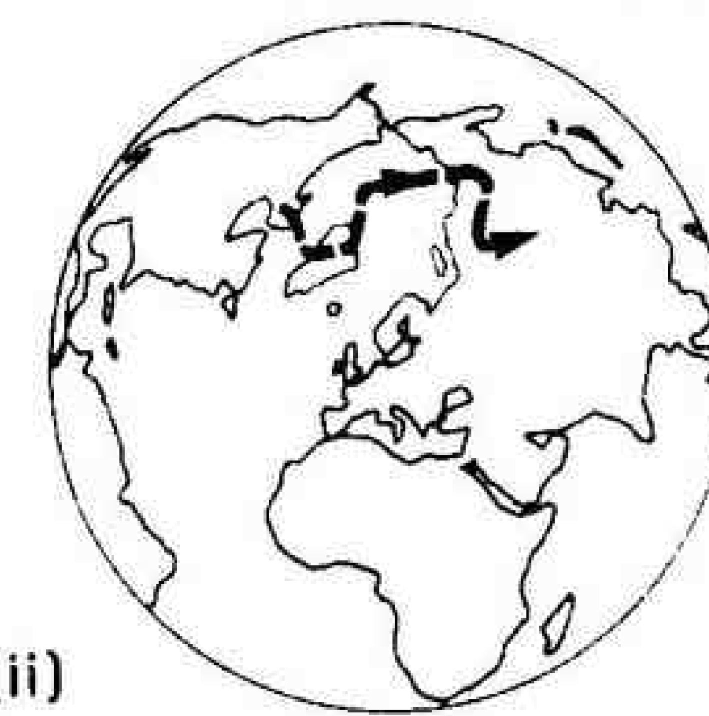


Fig. 34. *Dos representaciones de un itinerario ártico. (i)* La ruta del explorador parece dar un salto brusco en el Polo Norte. *(ii)* El camino en realidad es continuo.

trayectoria termina ahí, o bien reaparecerá en algún lugar del borde, moviéndose hacia dentro a partir de él. Dado que un explorador ártico no deja de existir cuando llega al Polo Norte, la última alternativa es la que corresponde a la realidad. En la figura 34 el explorador se acerca al Polo Norte por el meridiano de Greenwich y, siguiendo en un camino recto, aparece evidentemente alejándose del Polo según el meridiano de 180º. Cuando se muestra sobre la superficie de la esfera (figura 34[ii]) la trayectoria es, obviamente, continua. Sólo sobre el mapa con bordes aparece este corte curioso y artificial.

La única forma de reflejar una esfera sobre un mapa plano con bordes de forma totalmente exacta es hacer un agujero en algún lugar de la esfera. Supongamos que la Tierra fuera hueca y que hubiera un agujero en el Polo Norte. La Tierra ya no tendría entonces la topología de una esfera, ya que habría un agujero en ella. De hecho, una superficie esférica con un solo agujero tiene la misma topología que una hoja limitada, tal como se puede ver fácilmente si imaginamos que la esfera está hecha de una membrana muy flexible. Si se estiran los bordes del agujero, podemos "desplegar" la esfera, y si la extendemos sobre una hoja plana, tendrá por límite el borde de lo que empezó siendo el pequeño agujero (véase figura 35).

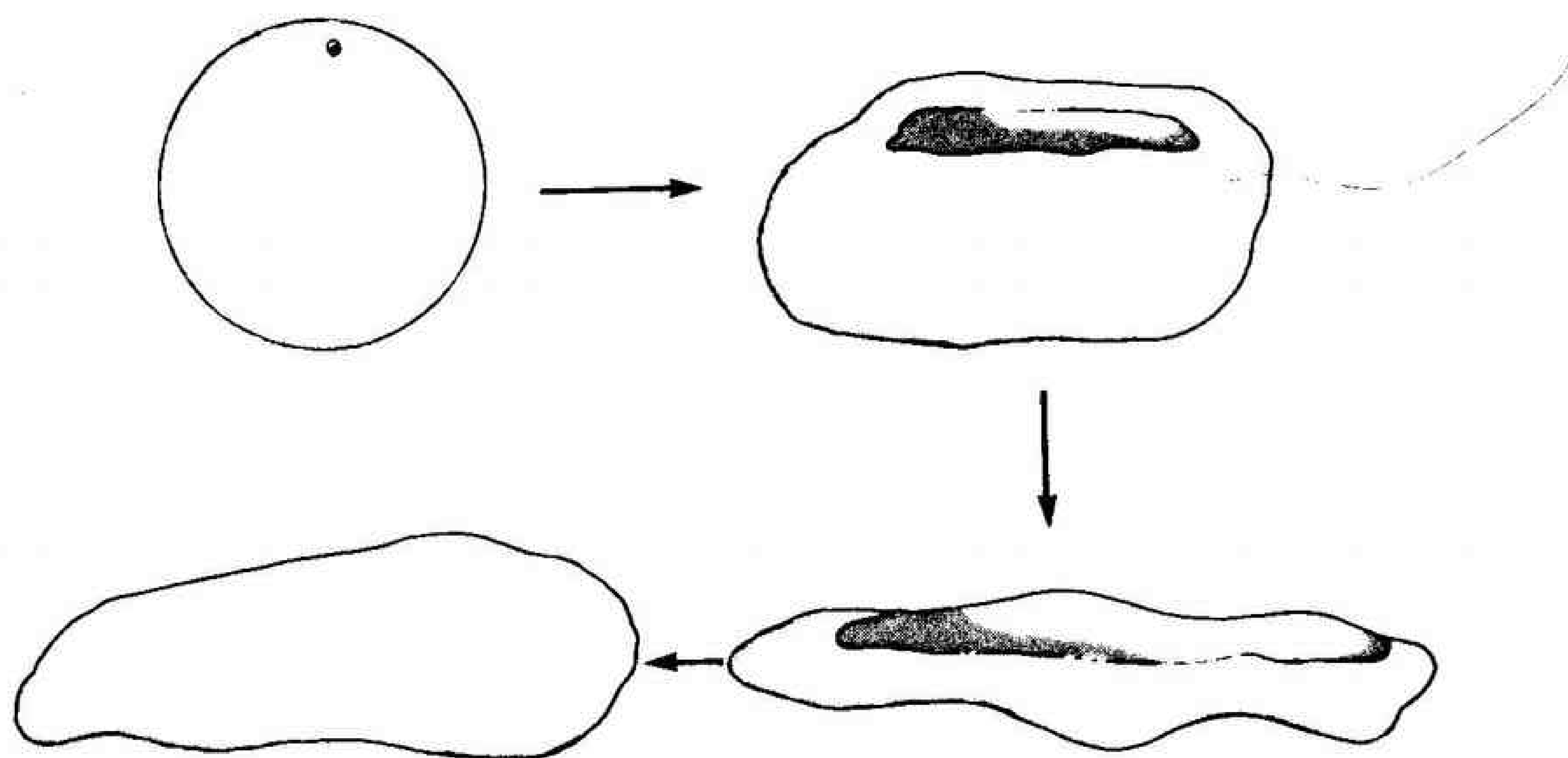


Fig. 35. *Cómo se extiende una esfera.* Cuando ésta tiene un agujero, por pequeño que sea, su topología resulta ser la de una hoja limitada, como puede verse abriéndola. El borde del agujero se convierte en el borde de la hoja.

Si la Tierra fuese realmente así no habría problema en representar la trayectoria de los exploradores en el mapa –esta vez se aplicaría la primera de las dos posibilidades que hemos mencionado–; la trayectoria del explorador se detendría al llegar al Polo Norte, ya que caería por el agujero.

Volviendo a la figura 33 podemos ver cómo es posible, cuando hay un agujero en el Polo Norte, hacer una proyección punto a punto, sobre una hoja plana. Poniendo la luz exactamente en el agujero, todos los rayos de luz atravesarían ahora una sola vez la superficie esférica: no se produciría superposición de imágenes, y el borde del agujero se proyectaría formando el borde del mapa.

Es importante observar que, aunque hemos estado pensando en un agujero pequeño pero finito, la topología de la esfera se ve alterada tan pronto como extraemos un solo punto. Una proyección exacta, punto a punto, sin superposiciones sobre un mapa con límites es posible con sólo quitar un punto, digamos, por ejemplo, en el Polo Norte. Para que la imagen resultante encajara en un pequeño mapa, deberíamos abandonar el método empleado en la figura 33 y utilizar lentes que curvaran los rayos de luz que se dirigieran lejos para que se proyectaran en el mapa. La imagen podría resultar notablemente distorsionada, pero en principio no hay problema. El punto seguiría abierto y dispuesto para formar el borde del mapa.

Volviendo al caso del colapso gravitatorio, podemos ver una analogía directa con el problema de la proyección de la Tierra. Las líneas curvas tales como PQ que unen puntos sobre las superficies de luz S_1 y S_2 con sus correspondientes sucesos causales sobre H (figura 32) son más bien como la proyección de la esfera sobre el mapa plano en la figura 33. Y el obstáculo topológico que aparece es el mismo. La superficie es aparentemente cerrada y continua, sin límites. La imagen sobre H tiene un límite. Algo tiene que ceder.

La única conclusión posible que podemos extraer de este examen topológico es sorprendente. La superficie de luz también debe tener un agujero, como el hipotético agujero en el Polo Norte de la figura 35. A medida que la luz cae en este agujero desaparece del espacio-tiempo, como el explorador que deja de existir. Dónde va la luz constituye una cuestión controvertida: volveremos sobre ella más adelante. Pero claramente no puede quedarse en el Universo tal como nosotros lo concebimos. Ésta es la extraordinaria consecuencia del teorema de Penrose.

Penrose no pudo demostrar que la estrella en su colapso se comprime siempre hasta un punto de materia infinitamente densa.

La "singularidad" de Penrose es en realidad un "agujero" o "borde" del espacio-tiempo. Una estrella infinitamente compactada constituiría una singularidad de Penrose, ya que cuando la densidad de la estrella se hace infinita, la curvatura del espacio-tiempo a su alrededor se vuelve infinita también. Cuando esto ocurre, el espacio-tiempo se abre y aparece un agujero. No obstante, incluso si la estrella no queda infinitamente aplastada, puede aparecer este agujero en el espacio-tiempo. Por lo tanto, y en adelante, cuando nos referiremos a singularidades, lo haremos teniendo presente que es en el sentido amplio utilizado por Penrose.

Llegado este punto es importante resaltar la diferencia entre una teoría y un teorema, cosa que no siempre se entiende de forma clara. Cuando los científicos formulan una teoría sobre el mundo, es fundamentalmente una conjetura –una suposición elaborada, una idea repentina o una intuición. Como ejemplo de una teoría que existe desde hace mucho tiempo tenemos la de que la materia está compuesta en esencia por muchas partículas idénticas, o átomos. Una teoría alternativa, hoy desacreditada, es la de que toda sustancia material es continua, por pequeña que sea la escala a la que la examinamos. A menudo la palabra teoría, en particular cuando se utiliza en el lenguaje corriente, equivale a una idea formulada vagamente. Los detectives de policía, por ejemplo, tienen muchas veces una teoría, sin pruebas, sobre la identidad de un criminal.

En el discurso científico una teoría correcta equivale a mucho más que a una mera conjetura. Para conseguir una aceptación general, la teoría debe desarrollarse de acuerdo con un modelo predictivo detallado, susceptible de ser comprobado mediante el experimento y sensible a cualquier falsificación. Los físicos tienen un mayor respeto por aquellas teorías que tienen un esquema matemático riguroso que puede ser utilizado para calcular una gran variedad de efectos. La relatividad general es una de estas teorías. Einstein proporcionó un conjunto de ecuaciones cuya resolución desafía a cualquiera en un intento de comprobar la capacidad predictiva de la teoría. O bien son correctas estas ecuaciones, o por el contrario están equivocadas. Esta última posibilidad solamente puede demostrarse mediante la experimentación.

En cambio, por muchos experimentos que hagamos no podremos demostrar que la teoría sea correcta, ya que siempre será posible imaginar infinidad de otras teorías que coincidan con la relatividad general en esos experimentos que hemos realizado, pero que difieran en otros que todavía no se han llevado a cabo. Todas estas

teorías podrían ser competidoras válidas para ser tomadas en consideración. En esta situación, la capacidad de persuasión de una teoría en particular debe basarse siempre en otros criterios, fundamentalmente estéticos, tales como la simplicidad y la elegancia. Estas características adicionales suponen juicios de valor por parte de la comunidad científica, que no pueden ser definidos ni cuantificados rigurosamente. Pero cualquier descripción del mundo natural es universalmente aceptada mediante este espíritu restrictivo.

Suponiendo que aceptamos una teoría, como la relatividad general, en base a su confirmación experimental, a su capacidad predictiva, a su vulnerabilidad ante la falsificación y a su atractivo estético global, aparece entonces la cuestión de las consecuencias lógicas de la teoría. Si suponemos que las ecuaciones de Einstein son correctas, podemos pasar a examinar las situaciones a las que nos llevan inevitablemente.

Así llegamos al tema de los teoremas. Un teorema, en el sentido original de la palabra griega, es una afirmación que es lógicamente correcta dados un cierto número de supuestos (o axiomas) que aceptamos sin discusión. Es decir, dadas las proposiones A, B y C es posible probar D. En este caso, D no es una *teoría*, expuesta a falsificación, sino un *teorema:* una afirmación de un hecho. Evidentemente se pueden discutir las proposiciones subyacentes A, B y C, pero D no puede cuestionarse aisladamente, ya que cada paso en la demostración del teorema debe ser una consecuencia lógica de los hechos aceptados anteriormente.

La geometría constituye la aplicación clásica de la deducción lógica a partir de axiomas aceptados. Los axiomas parecen fuera de toda duda (por ejemplo, entre cada par de puntos distintos podemos trazar una línea recta). Un teorema, como el famoso de Pitágoras sobre los triángulos rectángulos, es la afirmación de un hecho, deducida lógicamente a partir de los axiomas. Desde luego es posible, e incluso necesario, cambiar uno de los axiomas de la geometría griega (en concreto, el axioma de que por un punto exterior a una recta pasa una sola recta paralela a ésta es falso en la práctica) cuando tratamos con la gravedad, y en este caso el teorema de Pitágoras ya no será una afirmación correcta en el nuevo sistema.

Volviendo al *teorema* de Penrose, debería quedar completamente claro que Penrose no está *conjeturando* que el espacio-tiempo tiene un agujero. Penrose *demostró,* a partir de principios matemáticos inapelables basados en la lógica universalmente aceptada, que al menos un rayo de luz no puede continuar indefinida-

mente en el espacio-tiempo caracterizado por la existencia de una superficie atrapada T, una sección espacial inicial H y la suposición de la convergencia continua de los rayos de luz. Los tres requisitos pueden ser discutidos –y lo haremos–, pero dados estos supuestos es imposible cuestionar el resultado.

Antes de examinar con más detalle las implicaciones del teorema de Penrose, debemos mencionar las posteriores extensiones de este trabajo. El teorema se publicó en enero de 1965, y fue seguido por una ráfaga de interés entre los físicos. Apareció entonces en breve tiempo una serie completa de artículos, la mayoría de Penrose, Stephen Hawking y George Ellis, de la Universidad de Cambridge, y Robert Geroch, de la Universidad de Chicago. El objetivo de estos posteriores desarrollos fue el de extender el alcance del teorema original y, a ser posible, reducir algunos de los supuestos sin perder el resultado fundamental: que los agujeros del espacio-tiempo (que no deben confundirse con los agujeros negros) son inevitables en un amplio abanico de circunstancias.

Se prestó mucha atención al tema de la cosmología –el movimiento y el comportamiento del Universo como un todo–, más que al destino de una simple estrella. Hawking pudo demostrar que las superficies atrapadas pueden producirse por todo el Cosmos. Esto podría implicar que toda la creación está condenada a encontrar una singularidad. Las consecuencias del resultado de Hawking y de otros trabajos cosmológicos serán vistas en detalle en el capítulo 8.

Uno de los resultados del trabajo posterior fue la supresión del requisito de que la sección espacial H de la figura 32 fuera de extensión infinita. Incluso en un Universo finito, en el que el espacio está encerrado en un volumen finito, se producirán singularidades bajo circunstancias muy plausibles.

¿Que podemos hacer con estos resultados matemáticos? Hay varias opciones posibles. La primera es poner en duda las suposiciones que hemos utilizado en la demostración de los teoremas. Como ya hemos dicho, no es en absoluto necesario suponer la existencia de una sección espacial infinita H en algún instante inicial. Ello nos lleva a la cuestión de si una superficie atrapada llegará nunca a formarse en el Universo y si, en el caso de que se forme, los rayos de luz en las superficies cuasi-cónicas S_1 y S_2 de la figura 31 continuarán hasta el vértice.

La formación de una superficie atrapada depende de que la fuerza de la gravedad en una región del espacio-tiempo se haga tan potente que la luz no pueda escapar. En el capítulo 3 vimos que

para una estrella típica esta situación se produciría en el caso de que ésta se contrajera hasta un tamaño alrededor de un kilómetro. ¿Es realista una situación como ésta? Se conocen estrellas que son solamente un poco mayores de este tamaño: las llamadas estrellas de neutrones, que se cree que constituyen los restos de las explosiones de estrellas masivas cuyos núcleos han colapsado bajo la fuerza de su propio peso hasta formar una bola de neutrones. La existencia de un curioso efecto subatómico conocido como el principio de exclusión de Pauli impide el posterior colapso de las estrellas de neutrones. Sin embargo, el principio de Pauli únicamente puede llegar a sostener una cierta masa de neutrones y si la estrella tiene una masa equivalente a la de, digamos, cinco soles, entonces se sabe que proseguiría la contracción.

Se conocen muchas estrellas de masas superiores en cinco veces la del Sol. En una ojeada al cielo se pueden ver varias estrellas de diez o más masas solares. A pesar de esto, no es posible afirmar que al final de su ciclo de vida tales estrellas irán a parar al interior de una superficie atrapada, es decir, que terminarán en un agujero negro. Esto es debido a que existen varios mecanismos por los cuales la estrella puede perder material durante sus últimos estertores. Frecuentemente las estrellas viejas despiden una capa externa hacia el espacio, de forma similar a una serpiente que cambia su piel: esto puede ocurrir varias veces. Además hay explosiones aún más espectaculares en estrellas masivas, cuyos núcleos se han consumido y ya no pueden soportar su propio peso. Estas explosiones, llamadas supernovas, serán descritas en detalle en el próximo capítulo.

Dado que los detalles de las últimas etapas de la vida de las estrellas son todavía poco conocidas, ningún astrónomo puede afirmar con seguridad que los agujeros negros constituyen el final inevitable de la vida de una estrella masiva. No obstante, y según los datos que se poseen, parece probable que una proporción importante de las estrellas acaban en el interior de superficies atrapadas y, al ser tan numerosas las estrellas es difícil creer que nuestra galaxia no contenga alguna de ellas. En el próximo capítulo examinaremos algunas de las evidencias que, a este respecto, existen en la actualidad.

Lo que preocupa a los físicos respecto a los teoremas sobre singularidades no es tanto si el número de estrellas que acaban produciendo singularidades es grande o pequeño, como el hecho de que tal eventualidad sea en principio posible. Incluso si se pudiera demostrar que todas las estrellas normales escapan finalmente a su

destino de agujeros negros, podríamos aún imaginar una tecnología suficientemente poderosa como para crear deliberadamente un agujero negro.

Una técnica directa, aunque costosa, para construir un agujero negro se basa en el hecho de que, tal como veremos en el próximo capítulo, cuanto mayor sea la masa del objeto en cuestión, menor será la densidad del material cuando se forme la superficie atrapada. Por ejemplo, una estrella con la masa de nuestro Sol tiene que comprimirse por encima de las densidades nucleares (unos mil billones de gramos por centímetro cúbico) para que se forme un agujero negro. Por otro lado, una estrella de cien masas solares se convertirá en un agujero negro con una diezmilésima parte de esa densidad. Para un objeto de un millón de masas solares solamente sería necesaria una densidad de un kilogramo por centímetro cúbico, densidad muy modesta en términos astronómicos. Cuando nos vamos a mil millones de masas solares, la densidad requerida está por debajo de la del agua. Por lo tanto, si se amontonara deliberadamente un número suficientemente elevado de estrellas, se convertirían en un agujero negro sin necesidad de que se tocaran unas con otras. Es evidente que no se puede eludir la posibilidad de un agujero negro, tanto si se producirá verdaderamente o no en el Universo real.

Teniendo en cuenta que hay que tomar en serio las superficies atrapadas, la única esperanza de evitar una singularidad del espacio-tiempo sería que una vez los rayos de luz empezaran a converger en la forma representada en la figura 31, hubiera algo que los desenfocara de manera que no se intersectaran. Esta condición referente a la concentración de los rayos de luz ha sido estudiada en profundidad. Se puede relacionar el efecto con la gravedad del material en la región de las superficies cuasi-cónicas S_1 y S_2. Por así decirlo, en tanto el material continúa atrayendo gravitatoriamente, la luz convergerá inexorablemente. La única forma de evitarlo sería si pudiera existir la gravedad *repulsiva*.

La gravedad repulsiva es una idea tan extraordinaria que vale la pena discutirla con detalle. Los encantos de la levitación están tan profundamente arraigados en la sociedad humana que resulta evidente que el liberarse de la gravedad es una fantasía extraordinariamente estimulante. Freud describió la sensación de flotar o de volar como una imagen que aparece una y otra vez en los sueños, y mucha gente tiene este sueño algunas veces. Las leyendas de superhombres voladores, de yoguis y otros místicos que levitan, así como los trucos de "la chica que levita", típicos de los prestidigitadores,

dan testimonio del singular interés del hombre por la idea de dominar la gravedad. Ciertamente, incluso hoy en día hay gente crédula que se deja embaucar por rituales y procedimientos misteriosos dirigidos específicamente a dotarles con el poder de levitar sin caer.

Pero la levitación no se reduce a trucos y mitos. Los escritores de ciencia-ficción H. G. Wells y Julio Verne recurrieron a las sustancias levitatorias para hacer que pesadas máquinas se sostuvieran en el aire. La "cavorita" de Wells, ayudaba al protagonista a visitar de esta manera la Luna. Incluso en algún recóndito lugar de muchas mentes científicas (y en algún lugar no tan recóndito de las mentes militares) reside la esperanza de que la levitación –o la antigravedad, como se la llama a veces– pueda un día convertirse en realidad. Las implicaciones tecnológicas de tal posibilidad serían impresionantes. Se acabarían los vulgares cohetes, los ruidosos motores de avión, las autopistas congestionadas y los astilleros –en su lugar todo se trasladaría plácidamente de un sitio a otro–.

La teoría general de la relatividad de Einstein hace predicciones muy concretas en el tema de la antigravedad, que desgraciadamente eliminan por completo las aspiraciones de levitación que hemos mencionado. El peso de un cuerpo es proporcional a su masa. A veces se utiliza esto para argumentar que si pudiera existir un cuerpo de masa *negativa* tendría peso negativo, es decir, podría levitar o caer hacia arriba. Sin embargo, esto es un error. Es cierto que una masa negativa sería repelida por la gravedad terrestre y experimentaría una fuerza hacia arriba, pero como su masa sería negativa este cuerpo también tendría inercia negativa. Es decir, cuando empujáramos al cuerpo en una cierta dirección, se movería en la dirección opuesta. Es evidente que un objeto como éste no podría estar hecho de materia ordinaria, ya que si lo empujáramos con la mano penetraría por el brazo. Cuando se le dejase libremente sobre el suelo su masa negativa respondería a la fuerza de levitación hacia arriba cayendo de la forma usual. ¡Se acabó la "cavorita"!

La existencia de una masa negativa tendría otros efectos curiosos. Si dos cuerpos, uno normal con masa positiva y el otro con igual cantidad de masa negativa, se colocaran uno al lado del otro, entonces su comportamiento sería de lo más curioso. La fuerza de la gravedad actuaría entre ambos, pero, dado que uno tiene masa negativa, la fuerza sería de hecho repulsiva, es decir, levitatoria. Como hemos dicho antes, la masa negativa, con su inercia negativa, caería hacia el otro cuerpo por efecto de la fuerza levitatoria. La masa normal (positiva), por su parte, sentiría la repulsión, pero al te-

ner propiedades inerciales normales (positivas), se alejaría de la otra al estar sometida a la fuerza levitatoria. Así pues, ambas masas se moverían en la misma dirección. Tan pronto como la masa negativa cayera hacia la positiva, ésta se alejaría de ella y la singular pareja iría persiguiéndose por todo el Universo a velocidad creciente y separada por una distancia fija. ¡Ésta sí que sería una buena posibilidad de ingeniería!

A pesar de que una masa negativa no se comportaría de forma anormal, si bien cuando estuviese sometida al campo gravitatorio de un objeto mucho mayor, la fuerza gravitatoria que ejercería sobre otras masas positivas sería repulsiva, como hemos indicado. Si la Tierra tuviera masa negativa, caeríamos hacia arriba al aproximarnos a ella.

Volviendo al tema del colapso gravitatorio y los teoremas sobre singularidades, podríamos imaginar vagamente cómo podrían curvarse los rayos de luz de forma que retrocedieran antes de llegar a la singularidad si pensamos que de alguna manera la estrella en colapso adquiere una masa negativa cuando se aproxima a densidades muy elevadas. La acción de esta fuerza levitatoria repelería hacia afuera a los rayos de luz y el espacio-tiempo se salvaría. ¿Podemos considerar seriamente la idea de la masa negativa?

Primero es necesario observar que, de acuerdo con la teoría general de la relatividad, la masa no es la única causante de la gravedad. A ella también contribuyen la presión, la tensión y la energía. Si alguna de estas magnitudes se vuelve negativa en cantidad suficiente, aparecería la levitación. En los últimos años los físicos han estado investigando en un intento de descubrir situaciones en las que pueda aparecer energía negativa. Se sabe desde hace tiempo que ciertos procesos subatómicos complejos pueden, en principio, producir energía negativa, y la cuestión radica en si estos procesos pueden ocurrir en las condiciones extremas asociadas al colapso gravitatorio. Dado que no tenemos la más mínima esperanza de llegar a experimentar con una estrella en colapso, la cuestión permanece abierta, con la teoría matemática como única guía. En el momento de escribir esto, los trabajos teóricos predicen ciertas circunstancias en las cuales se podrían evitar las singularidades por medio de energía o presión negativas, pero estas circunstancias son bastante rebuscadas.

Si no se forma una singularidad, o si parte de la estrella en colapso no llega a ella, lo que le ocurre a la estrella queda inmerso en el misterio. Como explicamos en el capítulo anterior, al estar en el

interior del horizonte de sucesos, la materia no puede escapar hacia el Universo que conocemos, pero si no desaparece en una singularidad tiene que pasar a una región del espacio-tiempo que desconocemos. A veces a estas regiones desconocidas se las denomina otros Universos, estableciendo el colapso gravitatorio un puente o túnel hacia estos enigmáticos mundos "paralelos". La estrella en colapso, o cualquier materia que caiga posteriormente, cae presumiblemente por túnel hacia otro Cosmos parecido al nuestro.

En realidad no se sabe cómo sería el otro extremo del túnel. A veces se lanza la conjetura de que la materia que cae por el túnel desde nuestro Universo, aparece en el otro. Y al revés, el colapso de una estrella o de otro objeto en el otro Universo nos parecería una erupción explosiva en el nuestro. No faltan explosiones de objetos astronómicos que podrían estar de acuerdo con esta hipótesis, siendo los llamados quasars (acrónimo inglés de radiofuente cuasiestelar) candidatos especialmente adecuados, que examinaremos con más detalle en el próximo capítulo.

No hay motivo para suponer que sólo haya otro Universo involucrado en este proceso; podría ser que cada estrella en colapso nos conectara con un Cosmos diferente. De hecho, en un modelo idealizado de un agujero negro cargado eléctricamente o en rotación, la singularidad no bloquea todo el espacio-tiempo –por así decirlo hay un agujero o túnel en él– y un observador podría caer por el túnel hacia otro Universo. Pero si quisiera volver no reaparecería en nuestro Universo, ya que ello violaría la causalidad. En su lugar se trasladaría a un tercer Universo. Si repitiera la caída, llegaría a un cuarto y un quinto Universo y así sucesivamente. Parecen necesarios infinitos Universos si se considera seriamente este modelo.

Muchos físicos se sienten claramente incómodos con la idea de otros Universos que se unen con el nuestro a través del interior de los agujeros negros. Muchas veces se considera preferible suponer que la materia que cae en el interior de una superficie atrapada encontrará necesariamente una singularidad y desaparecerá del espacio-tiempo, si bien los teoremas sobre singularidades no hacen ninguna predicción al respecto.

Y a continuación nos preguntamos, ¿que es exactamente lo que le ocurre a la materia que llega a la singularidad? La pregunta es más filosófica que física. Las clases de singularidad mejor conocidas por los físicos son aquellas relacionadas con el crecimiento ilimitado de la curvatura del espacio-tiempo, tales como las que ocurren si una estrella perfectamente esférica colapsa. La curvatura infinita

implica fuerzas gravitatorias infinitas, de manera que la materia estará sometida a una violencia ilimitada en su caída. En primer lugar, la materia más cercana a la singularidad será atraída más violentamente que la más alejada, de forma que el material se desgarrará. En segundo lugar, el empuje hacia adentro lo prensará en un volumen de espacio que disminuirá continuamente hasta quedar reducido a nada. Por lo tanto, el objeto en cuestión se desgarra y se aplasta a la vez. Toda estructura, por robusta que sea, sucumbirá finalmente ante la inmensa gravedad en la singularidad.

A pesar de que el objeto quede totalmente destrozado, es difícil evitar la impresión de que algo debe sobrevivir, unos escombros comprimidos y destrozados que quizás ni siquiera podamos llamar materia. Sin embargo, al parecer éste no es el caso, ya que considerada en sentido estricto la singularidad señala el fin del mundo físico y el fin de la física, así como el fin del espacio y del tiempo. Dicho en pocas palabras, cuando la materia llega a una singularidad del espacio-tiempo, alcanza el borde mismo de la existencia. No puede haber nada "más allá" que tenga cualquier relación con nuestro mundo, ya que ninguna influencia puede cruzar la barrera de la singularidad. Desde luego podemos imaginar toda clase de cosas en la otra cara de la singularidad, pero son vanas especulaciones, ya que no hay observación o experimento que se pueda llevar a cabo para comprobar tal idea, o que respalde una imagen frente a otra. La singularidad parece marcar el límite de todo aquello que podamos conocer, de todo aquello que tenga sentido para nuestro mundo.

Sin embargo, no todos los físicos aceptan la existencia de verdaderas singularidades, ni siquiera como una remota posibilidad. Argumentan que cuando la curvatura del espacio-tiempo alcanza un valor suficientemente elevado la teoría general de la relatividad, en la cual se basan los teoremas sobre singularidades, ya no constituye una descripción exacta de la realidad. De hecho es posible que la misma noción de espacio-tiempo deje de tener sentido bajo unas circunstancias excesivamente violentas como éstas.

Por poner un ejemplo, algunos han cuestionado la continuidad del espacio y del tiempo. En el capítulo 2 explicamos cómo los matemáticos consideran que una línea es infinitamente divisible y contiene más puntos que el infinito de los números enteros. No obstante, ningún experimento físico podría comprobar si la idealización matemática de una línea continua corresponde a las propiedades topológicas del espacio real. Supongamos, por ejemplo, que el espacio estuviera hecho en realidad de grandes cantidades de pequeños "trozos" juntos (átomos de espacio sin estructura interna, unidos formando una malla). Podríamos recurrir a un concepto similar para el tiempo: cada suceso estaría conectado con el siguiente de forma discontinua, a saltos, como los fotogramas de una película. Por muy exacta que fuera nuestra apreciación, por muy buena que fuera la resolución de nuestros instrumentos científicos, existiría siempre una escala menor de espacio y tiempo en la cual podría existir esta clase de malla discreta. Nadie tiene la más remota idea de cómo se comportaría una estrella en colapso en una situación así. ¿Acaso acabaría la estrella vagando entre los puntos de la malla, *dentro* del espacio-tiempo?

La idea de "átomos" de tiempo tiene una larga historia. En el siglo XII el filósofo judío Moises Maimónides escribía: "El tiempo se compone de átomos temporales... que de hecho son indivisibles." Es posible que esta afirmación estuviera basada en fuentes indias más antiguas. El monje franciscano Bartolomé el Inglés fue más explícito cuando, alrededor del año 1230 de nuestra era, escribió que en una hora hay 22.560 átomos temporales. Podemos descartar este pequeño valor dado que los modernos relojes pueden marcar intervalos mucho menores que la millonésima de segundo. Más tarde, nada menos que un pensador como Descartes aprobó la hipótesis de los átomos temporales, afirmando que la materia ordinaria estaría atrapada en cada instante, incapaz de perdurar, si no fuera por la continua intervención de Dios.

Sea como fuere, muchos físicos creen que no es correcto considerar al espacio y al tiempo como entidades primeras. Por ejemplo, John Wheeler considera al espacio-tiempo como una especie de bloque de material elástico. A gran escala parece continuo y deformable, pero un examen minucioso nos revela que en realidad está formado por átomos, y la deformación debida a la disposición cambiante de unos átomos con respecto a otros. Wheeler conjetura que puede existir una "pregeometría", de la cual estarían hechos el espacio y el tiempo de la misma manera que un medio elástico está hecho de átomos. Desde luego, esto no implica necesariamente que se puedan evitar las singularidades, ya que se puede comprobar que una goma se puede romper si se la retuerce o se la estira con violencia.

En general se acepta que cuando consideramos distancias e intervalos extremadamente pequeños tiene que producirse una inevitable modificación de las nociones usuales de espacio y tiempo. Esta creencia proviene de la aceptación de una teoría de los sistemas mi-

croscópicos muy comprobada y que ha tenido grandes éxitos, la llamada teoría cuántica que hemos mencionado brevemente al final del capítulo 2 y que se describe en detalle en mi libro *Otros mundos*. La base de esta teoría radica en que en la naturaleza hay una incertidumbre o impredictibilidad inherente que solamente se manifiesta a escala atómica. Por ejemplo, la posición de una partícula subatómica como el electrón puede que no sea un concepto muy bien definido; deberíamos considerarlo como moviéndose de forma aleatoria. La energía resulta también un concepto algo confuso, sujeto a cambios variables e impredictibles.

Uno de los efectos de estas fluctuaciones microscópicas consiste en que impide el colapso de los átomos bajo la acción de las fuerzas eléctricas entre el núcleo y los electrones que lo rodean. Algunos han apuntado que quizá también podría evitarse el colapso gravitatorio cuando una estrella se comprime hasta dimensiones submicroscópicas y entra en juego la teoría cuántica. Es fácil ver cómo podría ocurrir esto. El tamaño de la incertidumbre de la energía cuántica crece a medida que disminuye la escala de distancias. En el tamaño de un átomo, la energía fluctúa probablemente en unos pocos *electronvolts* (un *electronvolt* es la energía que adquiere un electrón al ser acelerado por un potencial eléctrico de un voltio). Desde el punto de vista gravitatorio tal energía es despreciable. Sin embargo, para dimensiones extremadamente pequeñas –alrededor de una millonésima de una billonésima de una billonésima de centímetro– la incertidumbre en la energía es tan grande que su efecto gravitatorio domina por encima del de la materia. La gravedad inducida cuánticamente es tan fuerte que puede incluso curvar el espacio-tiempo formando un conglomerado de agujeros y puentes; el espacio-tiempo parecería una estructura espumosa con una topología tremendamente complicada, más que un continuo. La unidad de tiempo por debajo de la cual estas singulares estructuras son importantes es casi inconcebiblemente pequeña: una diezmillonésima de una billonésima de una billonésima de una billonésima de segundo.

Si estas ideas se acercan, aunque sea remotamente, a la realidad, es evidente que los detalles del colapso gravitatorio y de las singularidades del espacio-tiempo se modificarían profundamente cuando la estrella se contrajera hasta estas dimensiones extremadamente pequeñas. En tal caso la singularidad no sería necesariamente el borde del Universo físico sino, de forma menos rigurosa, solamente el borde del espacio o del tiempo, o de ambos. Lo que haya detrás del espacio y del tiempo lo ignoramos todavía. Quizá es una malla o

una espuma esponjosa o alguna otra estructura completamente extraña y abstracta todavía por descubrir.

Hasta el presente los experimentos de laboratorio sólo han comprobado las ideas tradicionales y continuas del espacio y del tiempo hasta las dimensiones del orden de una milésima del núcleo atómico, es decir, alrededor de una millonésima de una billonésima de metro, que todavía es un millón de billones de veces mayor que la escala en la cual deberían aparecer los efectos cuánticos. Es perfectamente factible que con las energías aún más altas que se podrán alcanzar mediante "rompeátomos" (un tipo espacial de aceleradores de partículas) los experimentos subatómicos sean capaces de descubrir "átomos" de espacio y de tiempo en un próximo futuro, a escalas mayores que las de la zona "agujereada". Tanto si es así como si no, la singularidad del espacio-tiempo será siempre considerada por algunos como una señal de que son los conceptos familiares más que el mundo físico los que acaban en ella. De cualquier forma, la singularidad constituye sin ninguna duda la mayor crisis de la naturaleza.

5. Los agujeros negros y el censor cósmico

Una vez conocidos los teoremas matemáticos referentes a la formación de las singularidades del espacio-tiempo, los físicos comenzaron a preocuparse por sus implicaciones. La aparición de una singularidad en el espacio-tiempo tiene graves consecuencias para el mundo físico, tal como veremos en el próximo capítulo. ¿Cómo puede el Universo salvarse de tal monstruosidad?

En el teorema de Penrose original se hacía un uso extensivo de las propiedades asociadas a la existencia de la llamada superficie atrapada que examinamos en el capítulo anterior. Como su nombre implica, la superficie atrapada impide que la luz y la materia abandonen la región del espacio-tiempo cercana y que lleguen hasta un observador lejano. En consecuencia, si este observador no cae en el propio sistema en colapso no podrá asistir a los últimos estadios del mismo o a la aniquilación final del espacio-tiempo y de la materia en la singularidad. La información referente a este suceso violento, la cual ha de ser enviada al observador en forma de señales transportadas por partículas materiales, luz o algún otro tipo de radiación, está también atrapada. Como ya dijimos en el capítulo 3, el hecho de que la luz no pueda escapar de una región del Universo implica que un observador lejano verá esa región como un agujero negro. Si todas las singularidades ocurren únicamente en el interior de los agujeros negros, el resto del Universo se verá librado de todas sus desagradables consecuencias.

Si bien Penrose demostró que una superficie atrapada era una condición suficiente para que se produjera una singularidad, no probó que esta condición fuera necesaria. Existe la posibilidad de que se forme una singularidad incluso en ausencia de un agujero negro. A tales singularidades se las denomina desnudas, y se ha investiga-

do mucho para determinar si es posible que ocurran las singularidades desnudas o bien si siempre están escondidas en el interior de los agujeros negros.

En 1969 Penrose formuló su denominada "hipótesis del censor cósmico": "Estamos, pues, ante la que es probablemente la más fundamental pregunta todavía sin respuesta de la teoría del colapso en relatividad general, a saber: ¿existe un «censor cósmico» que prohíbe la aparición de singularidades desnudas, tapándolas en un horizonte de sucesos absoluto?" Podemos expresar esta idea de la siguiente forma, usando un lenguaje gráfico. A la naturaleza le repugnan las singularidades, y las esconde siempre a nuestra vista tapándolas con un agujero negro. La desnudez total, con todas sus escandalosas implicaciones, nunca se nos manifiesta como tal.

¿Existe en realidad un "censor cósmico" que prohíba las singularidades desnudas? ¿Tiene la naturaleza su propio mecanismo de escape que oculta las singularidades al resto de la creación? Se ha dedicado mucho esfuerzo en buscar dicho mecanismo o, por el contrario, en intentar demostrar que no existe, construyendo un modelo matemático que prediga de forma inequívoca una singularidad desnuda. Este trabajo continúa hoy en día, si bien la pregunta fundamental de Penrose sigue sin respuesta. Como veremos en próximos capítulos, las consecuencias de un Universo sin censor son también muy extrañas.

Antes de considerar seriamente la idea de las singularidades desnudas, y en ausencia de una observación directa, se deben cumplir dos condiciones. La primera es la existencia de algunos ejemplos explícitos en los cuales los cálculos efectuados sobre modelos matemáticos, utilizando la teoría de la relatividad general de Einstein, conduzcan a la formación de una singularidad sin el correspondiente horizonte de sucesos. La segunda es que exista alguna evidencia astronómica de que el tipo de colapso gravitatorio que se está debatiendo en este libro tenga alguna posibilidad de ocurrir en el mundo real. En este capítulo pasaremos revista a esta evidencia astronómica; en el próximo trataremos de algunas de las ideas teóricas referentes a la formación de singularidades desnudas.

Los físicos y los astrónomos son escépticos por naturaleza, como corresponde a unos científicos enfrentados a una desconcertante disposición de fenómenos inexplicables, y en consecuencia se inclinan a ser cautos con respecto a la idea de la súbita implosión de un cuerpo hasta la nada bajo la acción de su propia gravedad. Una singularidad desnuda, al ser un grado aún peor que un agujero ne-

gro, es considerada el peor de los dos males y consecuentemente las investigaciones actuales dirigidas a detectar sistemas en colapso gravitatorio se dedican casi totalmente a localizar y observar los efectos de los agujeros negros. Por lo tanto, nos ocuparemos ahora de la evidencia que se posee en la actualidad sobre los agujeros negros. Si esta evidencia sugiere, como es el caso, que los agujeros negros existen en realidad, entonces sabremos que la posibilidad de la existencia de las singularidades desnudas también debe considerarse seriamente, ya que parece probable que, a falta de un misterioso censor cósmico, el tipo de situación que da origen a la formación de un agujero negro podría también, con una pequeña perturbación, originar en su lugar una singularidad desnuda.

La primera especulación sobre lo que hoy llamamos agujeros negros se remonta al siglo XVIII, cuando el matemático y astrónomo francés Pierre Laplace argumentó que podrían existir estrellas tan masivas o tan compactas, o ambas cosas, que la luz no pudiera escapar a la acción de sus campos gravitatorios. No era necesario suponer la implosión de estas estrellas negras de la forma que conocemos hoy según la teoría de la relatividad, pero el hecho de que Laplace adivinara hace unos doscientos años la existencia de objetos negros y de intensa gravedad es sin duda alguna un extraordinario ejemplo de predicción científica.

Pierre Simon marqués de Laplace, nacido en 1749, era hijo de un granjero, y llegó a ser una de las mentes europeas más preclaras del siglo XVIII. Como profesor de la Escuela Militar de París supervisó el examen de ingreso de Napoleón en 1785 y fue un verdadero experto en congraciarse con la institución política. De este modo se granjeó una excelente reputación entre la sociedad francesa, recibiendo un título y grandes riquezas. Su viva inteligencia tocó muchos problemas fundamentales de las ciencias físicas, pero probablemente se le conoce más por sus trabajos de mecánica celeste, y en particular su "hipótesis nebular" de la formación del sistema solar, hipótesis muy utilizada por los astrónomos. Tenía algo de filósofo y se cuenta que le dijo a Napoleón que "no necesito esta hipótesis" en una discusión sobre la existencia de Dios. De hecho, en 1773 presentó una memoria a la Academia de Ciencias en la cual demostraba matemáticamente la estabilidad del sistema solar. Newton, que en ocasiones mantuvo opiniones religiosas muy radicales y originales, había proclamado que la intervención divina era necesaria en algunas ocasiones.

El razonamiento de Laplace en lo referente a las estrellas ne-

gras es sencillo, elegante y fácil de seguir. A veces se dice que "lo que sube ha de bajar", pero en estos tiempos de viajes espaciales sabemos, como ya sabía Newton en el siglo XVII, que esto no es cierto. Dado que la gravedad disminuye al alejarnos de la Tierra, de acuerdo con la ley del inverso del cuadrado de la distancia que discutimos en el capítulo 1, es evidente que podemos lanzar un cuerpo desde la superficie de la Tierra con la suficiente velocidad como para que escape de la región de fuerte gravedad y a partir de allí solamente experimente una leve atracción y en constante disminución. En este caso ya no volverá. La velocidad mínima necesaria para que un cuerpo escape del campo gravitatorio de la Tierra y desaparezca para siempre en el espacio se conoce muy adecuadamente con el nombre de velocidad de escape. Resulta ser de unos 11,5 km por segundo a nivel del mar. Ésta es la velocidad necesaria, por ejemplo, para que un cohete viaje a la Luna o más allá.

Todos los cuerpos astronómicos tienen una velocidad de escape, algunos mayor que la de la Tierra, otros menor. Su valor queda determinado por dos parámetros: la masa total del cuerpo, la cual determina su poder gravitatorio, y el radio del cuerpo, que establece la magnitud de la fuerza gravitatoria en la superficie. Una velocidad de escape elevada se debe a un cuerpo masivo o compacto, o ambas cosas. Por ejemplo, la velocidad de escape desde la superficie de la Luna es sólo de 2,4 km por segundo, mientras que para Júpiter es de 59,6. Para el Sol es, como mínimo, de 618,2.

Laplace observó que si una estrella es suficientemente masiva, este valor puede alcanzar la velocidad de la luz (unos 300.000 km por segundo). En estas circunstancias, decía, "la fuerza atractiva de un cuerpo celeste sería tan grande que la luz no podría escapar de él". Si la velocidad de escape sobrepasa la velocidad de la luz, entonces la luz no puede escapar. ¿Cuándo se iba a suponer que podría ocurrir una situación semejante?

En el capítulo anterior se hizo observar que, si agrupásemos deliberadamente millones de estrellas formando un grupo compacto, colapsarían todas ellas en un agujero negro sin necesidad de una mayor compresión más. Si echamos una ojeada a una enciclopedia de astronomía veremos muchos ejemplos de grandes cúmulos de estrellas formando grandes concentraciones. Por ejemplo, nuestra galaxia contiene docenas de los llamados cúmulos globulares, que contienen hasta un millón de estrellas cada uno, agrupadas formando una densa bola. En el centro del cúmulo globular la separación media entre estrellas es solamente de una décima parte de un

año luz, en comparación con los varios años luz de separación entre las estrellas próximas de nuestra galaxia.

Los movimientos de las estrellas en un cúmulo globular son complicados debido a la acción mutua de las fuerzas gravitatorias entre todas ellas. Sin embargo, se puede deducir de ello una característica general. Si bien son muy extrañas las verdaderas colisiones físicas entre estrellas individuales, las cuasi-colisiones hacen que con frecuencia las estrellas se separen de sus trayectorias. Las estrellas del núcleo se arremolinan más o menos aleatoriamente, sin posibilidad de escapar al espacio galáctico debido a la atracción gravitatoria del resto del cúmulo. Pero a veces, y debido a alineación fortuita de movimientos y a una adecuada sucesión accidental de las colisiones, algunas estrellas adquieren mayor energía que las otras y por consiguiente se mueven más rápidamente. Algunas llegan a adquirir la suficiente velocidad como para escapar del cúmulo. Lenta pero constantemente, a lo largo de cientos de millones de años, las estrellas se "evaporan" de la región central.

Como en el caso de un líquido, la evaporación enfría lo que queda para que pueda proporcionarse la energía suplementaria a las partículas que se van. Enfriar un cúmulo estelar quiere decir hacer más lentas a las estrellas de manera que no puedan mantener la agitación colectiva necesaria para resistir a la omnipresente atracción hacia el centro de gravedad. Por lo tanto, para compensar la energía de las estrellas expulsadas, el cúmulo debe contraerse, y por ello hace que las estrellas del ya apretujado núcleo del cúmulo globular se junten todavía más. Esto sugiere que estos cúmulos tienen un tiempo de vida finito, y que al final colapsan en un agujero negro, rodeado tal vez por un halo difuso de estrellas. Los cálculos sugieren que el colapso tarda entre diez y diez mil millones de años en ocurrir, y dado que las observaciones otorgan a los cúmulos globulares unas edades de unos diez mil millones de años (es decir aproximadamente la edad de la galaxia [véase capítulo 8]), debemos concluir que muchos cúmulos globulares de nuestra galaxia ya hace tiempo que han colapsado en agujeros negros. Los cúmulos que ahora vemos son solamente viejos vestigios que todavía sobreviven. Se puede calcular que cientos de agujeros negros, con masas de, digamos, mil veces la solar, esconden por nuestra galaxia los restos de los desafortunados cúmulos globulares.

Como se desconoce la apariencia de un cúmulo globular muerto, los astrónomos han dirigido su atención hacia la búsqueda de aquellos cúmulos todavía vivos que pueden estar en proceso de co-

lapso hacia un agujero negro. La idea es que una vez se haya formado una pequeña "semilla" en el centro, irá atrayendo irresistiblemente a otras estrellas, de forma que la distribución de las estrellas en el núcleo de un cúmulo globular que contenga un agujero negro mostrará una concentración inexplicable de estrellas hacia el centro donde se sitúa el agujero. Hasta el momento las búsquedas mediante telescopios no han proporcionado evidencia decisiva de un fenómeno como éste.

Otro lugar donde las estrellas se concentran extraordinariamente es en el centro de las galaxias, y los astrónomos han estado especulando durante mucho tiempo que allí se forman masivos agujeros negros. Desgraciadamente, el centro de nuestra galaxia queda muy oculto por el gas y el polvo y sería extraordinariamente difícil detectar, mediante métodos tradicionales, los efectos de agujeros negros que, a pesar de su masa, son probablemente menores que el sistema solar.

Con todo, se podría utilizar un desarrollo tecnológico muy reciente para "ver", a través del material que lo tapa, el "corazón" de la galaxia. Es el llamado telescopio de ondas gravitatorias. La mayor parte de los telescopios funcionan detectando y analizando ondas electromagnéticas, como la luz, las ondas de radio o los rayos X. Un telescopio de ondas gravitatorias responde a las ondas del campo gravitatorio, en lugar del campo electromagnético. Las ondas gravitatorias se producen siempre que se forman perturbaciones sobre grandes cantidades de materia, como por ejemplo cuando una estrella cae en un agujero negro masivo. Se puede suponer que la energía equivalente a diez veces la producida por la estrella, durante toda su vida de varios miles de millones de años, se emite en el colapso en un pulso de una duración de una décima de segundo. La "luminosidad" gravitatoria de una fuente como ésta es de mil millones de billones de billones de billones de kilowatios.

A pesar de la colosal emisión de energía que se espera del brutal encuentro entre un agujero negro y los restos estelares en el centro galáctico, las ondas gravitacionales interactúan tan débilmente con la materia que son casi imposibles de detectar. En el próximo capítulo describiremos algunos de los experimentos que se están llevando a cabo para conseguir este propósito.

Otra posibilidad es la de descubrir un agujero negro masivo en el centro de una galaxia que no sea la nuestra. Paradójicamente es más fácil detectar los efectos de un agujero a gran distancia que cuando éste está inmerso en las complejidades de nuestra propia

galaxia. En 1978 varios astrónomos británicos y norteamericanos llevaron a cabo un detallado estudio fotométrico de dos galaxias conocidas como "elípticas" debido a su característica forma de pelota aplastada, en contraste con la estructura espiral más corriente. Una de éstas, llamada M87, había sido descubierta y catalogada doscientos años antes por el astrónomo francés Charles Messier (de ahí la M). Se sabía desde hacía algún tiempo que algo singular ocurría en el centro de M87, y las nuevas observaciones vinieron a confirmarlo. Los astrónomos compararon la disposición de las estrellas de M87 con las de otra elíptica llamada NGC3379 y encontraron una extraordinaria diferencia. Como era de esperar, en ambos casos la densidad de estrellas crecía sistemáticamente hacia el centro de la galaxia, ya que las estrellas tienden a concentrarse cerca del centro de gravedad. Pero lo extraordinario era la forma en que las posiciones y los movimientos de las estrellas en las proximidades del centro de M87 parecían fuertemente perturbadas por un invisible y compacto objeto masivo, de la forma exacta que uno esperaría si un enorme agujero negro estuviera ejerciendo su influencia gravitatoria sobre las estrellas próximas. Unos perfiles de densidad tan dispares en dos galaxias tan similares llevaron a los astrónomos a sugerir la probabilidad de la existencia de un enorme agujero negro en M87, con una masa de alrededor de unos cinco mil millones de veces la masa solar.

Poco antes de que se publicara el artículo en *The Astrophysical Journal* las noticias de este resultado se filtraron a la prensa y se proclamó a voces el definitivo descubrimiento de un agujero negro. Si bien una afirmación tal es probablemente prematura, parece muy posible que M87 contenga uno de estos enigmáticos objetos. Las futuras observaciones aclararán sin duda este tema.

Mirando aún más lejos, también los misteriosos objetos conocidos por el nombre de quasars (acrónimo inglés de objetos cuasi estelares, ya que a primera vista parecen estrellas próximas) han sido objeto de especulación como relacionados posiblemente con los agujeros negros. En realidad fue después del descubrimiento de los quasars, a principios de los 60, cuando los astrónomos comenzaron a considerar seriamente la idea de los agujeros negros, si bien tal nombre no se acuñó hasta 1968.

Los quasars, que parecen estar asociados a las galaxias elípticas, son considerados como los objetos más distantes del Universo visible, lo cual hace que su estudio sea difícil, ya que también son muy pequeños. Las estimaciones sitúan el tamaño de la región activa

central algo más de unas pocas veces el tamaño del sistema solar. Y sin embargo, de estas pequeñas regiones emana un flujo de energía superior al de una galaxia entera. Para suministrar tan colosal emisión de energía se requiere una masa total del orden de al menos cien millones de veces la solar. La concentración de tal cantidad de materia en un volumen tan pequeño como el de un quasar pone al sistema al borde mismo del colapso gravitatorio.

Si bien hay varios modelos rivales que no implican en absoluto a los agujeros negros, sería sorprendente que algunos quasars no tuviesen algún agujero negro. Los astrofísicos suponen un halo o disco de gas que rodea al agujero, y que cae en su interior o quizá forma una espiral a su alrededor. Complicados procesos viscosos, térmicos, acústicos y tal vez magnéticos generan y transportan hacia el exterior grandes cantidades de energía a través de este material que cae, desde donde se emite hacia el espacio en forma de ondas radio, luz y otros tipos de radiación. Si el agujero central está girando rápidamente, los estallidos de energía se producirán hacia determinadas direcciones. Se sabe que muchos quasars y galaxias en explosión tienen chorros o erupciones en unas direcciones que están muy bien establecidas.

La búsqueda de agujeros negros en el centro de los cúmulos globulares, de galaxias y de quasars está motivada por el conocimiento de que se formará un horizonte de sucesos alrededor de un grupo suficientemente grande de estrellas sin necesidad de que éstas se toquen las unas con las otras. Ello es debido a que la densidad del material necesaria para que se produzca un agujero negro disminuye con la cantidad total de materia. Parece por lo tanto inevitable que, dada la natural tendencia de los cúmulos estelares a contraerse, el producto final será un agujero negro.

Un segundo escenario para la formación de agujeros negros es totalmente diferente y supone estrellas individuales en lugar de cúmulos. En este caso la densidad de materia tiene que llegar a ser enormemente grande para que se forme un horizonte de sucesos. En el caso del Sol ya se ha hecho observar que su masa total debería contraerse hasta formar una bola de unos tres kilómetros de radio para que se forme un agujero negro. ¿Puede llegar a producirse un grado tan enorme de compacidad en una estrella? Cuando en 1939 J. Robert Oppenheimer y H. Snyder propusieron la idea por vez primera, no fue considerada seriamente por los astrónomos. En realidad no fue sino hasta finales de los 60, con el fortuito descubrimiento de los llamados pulsars, cuando salió del reino de la ciencia-ficción la posibilidad del colapso de estrellas individuales hasta formar agujeros negros.

Los pulsars son radiofuentes que se encienden y se apagan con gran rapidez, a veces docenas de veces por segundo, y gran regularidad. No se conoce ninguna manera en que una estrella ordinaria, o incluso una estrella enana blanca de tamaño semejante al de la Tierra, pueda pulsar tan rápidamente. Los pulsos son tan sumamente regulares que sugerían la presencia de un objeto que giraba, emitiendo un pulso de ondas radio en cada revolución. Pronto observaron los astrónomos que las emisiones radio del pulsar eran en forma de haz. Cada vez que el objeto gira, el haz barre la Tierra, como un faro, produciendo un breve radioflash.

Para que llegue a girar hasta 30 veces por segundo un objeto ha de tener un tamaño de tan sólo unos pocos kilómetros, ya que de otra forma la enorme fuerza centrífuga arrancaría el material del ecuador y la "estrella" se haría pedazos como si fuera una rueda de fuegos artificiales. Se propuso que el objeto central que mueve al pulsar es el resto de una estrella que se ha contraído bajo su propia gravedad y se ha hecho tan compacta que incluso sus átomos están aplastados. En lugar de estar hecha de materia ordinaria, esta estrella colapsada es como un grotesco núcleo atómico que consta casi exclusivamente de neutrones –una estrella de neutrones. El material está tan comprimido que un dedal de materia neutrónica contendría el equivalente a mil millones de toneladas de materia terrestre (digamos un kilómetro cúbico de roca). Y algo todavía más extravagante: la gravedad superficial en tal objeto comprimido sería muchos miles de millones de veces mayor que la de la Tierra, de manera que un dedal pesaría ¡más que todos los continentes de la Tierra juntos!

En cuanto se tomaron en serio las estrellas de neutrones pronto se hizo lo mismo con los agujeros negros. Comprimiendo un poco más una estrella de neutrones, ésta se convertiría en un agujero negro. Los estudios teóricos sobre el material neutrónico sugirieron que si la masa total de una estrella de neutrones fuera sólo ligeramente mayor que la masa de Sol, entonces la rigidez del material neutrónico no podría sostener el enorme peso de la estrella comprimida en el inmenso campo gravitatorio: se produciría el colapso catastrófico.

Las estrellas de neutrones y los agujeros negros pasaron a ser considerados como el fin natural del ciclo de vida de una estrella. Se puede imaginar la existencia de una estrella como una lucha en-

tre fuerzas que compiten. Por un lado, la gravedad intenta atraer al material hacia un volumen cada vez menor, mientras que por otro lado la presión interna debida a la enorme temperatura central intenta hacer estallar a la estrella en pedazos. Durante la mayor parte de su vida estas fuerzas rivales se las arreglan para compensarse y coexisten pacíficamente. Pero cuando una estrella se hace vieja aparecen las inestabilidades y la estrella puede explosionar o implosionar (o ambas cosas) a medida que desaparece el equilibrio entre las fuerzas.

En una estrella adulta como el Sol, el calor interno que lo sostiene contra la gravedad lo generan los procesos nucleares en la región central o núcleo. La naturaleza de la fuente del calor solar desconcertó durante mucho tiempo a los astrónomos. Los estudios espectroscópicos revelan que el Sol está formado fundamentalmente por hidrógeno, pero incluso con un gas tan reactivo como éste, su combustión ordinaria no mantendría encendido al Sol más allá de unos pocos millones de años. Dado que la Tierra contiene restos de vida fósiles de un antigüedad de varios miles de millones de años, tiene que existir en el Sol una fuente de energía más potente que la que pueden proporcionar los procesos químicos ordinarios. Con el descubrimiento de la energía nuclear se encontró la respuesta. El Sol y la mayor parte de las estrellas son enormes hornos nucleares, que funcionan gracias a la energía de fusión, como en el caso de la bomba de hidrógeno.

En la combustión ordinaria los átomos se reagrupan formando nuevos tipos de moléculas y liberando energía como resultado. Por ejemplo, cuando se quema madera o carbón en el aire, los átomos de carbono del combustible se combinan con los átomos de oxígeno del aire formando moléculas de dióxido de carbono (un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno). La fuerza que los mantiene unidos es de origen electromagnético y se deriva del hecho de que los átomos contienen partículas cargadas eléctricamente (electrones y protones). Cuando tiene lugar una combustión nuclear, son los núcleos centrales de los átomos los que cambian su disposición. En el Sol, por ejemplo, los núcleos de hidrógeno (protones) se unen formando los núcleos del elemento helio. La fuerza que mantiene unidas las partículas nucleares es centenares de veces más fuerte que las fuerzas electromagnéticas que unen los átomos formando moléculas, y en consecuencia la energía liberada es mayor. Convirtiendo el hidrógeno en helio el Sol puede mantener su flujo de calor durante diez mil millones de años. Y no falta combustible hidrógeno

en el Universo. Alrededor del 75 % del Cosmos está constituido por hidrógeno.

Incluso cuando una estrella ha agotado su combustible de hidrógeno su vida todavía sigue. La posterior fusión de núcleos de helio formando carbón y otros elementos puede seguir proporcionando una gran cantidad de energía durante mucho tiempo. Pero, para extraer esta energía adicional, la temperatura de la estrella debe elevarse, ya que cuesta más la combustión de estos elementos que la del hidrógeno. Esto ocurrirá automáticamente, ya que, cuando se ha terminado el hidrógeno en el núcleo de la estrella, se para la reacción de fusión, empieza a descender la presión y la gravedad comienza a triunfar en la omnipresente lucha entre fuerzas de compresión y expansión. El núcleo se comprime y, al igual que en el caso de los gases comprimidos, la temperatura aumenta. La compresión continúa hasta que la temperatura se eleva lo suficiente como para que empiece la combustión del helio y la estrella prosiga con su siguiente ciclo de consumición.

Los núcleos más pesados se van creando, uno por uno, por fusión de los más ligeros hasta que se llega a un punto, alrededor del elemento hierro, en el que la ganancia de energía por una nueva combustión nuclear se convierte en un déficit, y la estrella llega al final del camino. Ningún otro combustible nuclear puede mantener la presión interna necesaria para sostener a la estrella contra su propio peso. La gravedad, siempre acechante, dispuesta a aplastar a la materia, domina al núcleo inestable y lo hace colapsar casi instantáneamente. Si bien esto es una simplificación de lo que ocurre en el centro de la estrella, el resultado final del colapso del núcleo consiste en expulsar las capas exteriores de la estrella liberando una gran cantidad de energía y dejando un residuo compacto en el núcleo, bien sea una estrella de neutrones o un agujero negro. Así pues, la extraordinaria compresión necesaria para que una estrella se convierta en un agujero negro se plasma efectivamente en la violencia que acompaña a la muerte de una estrella.

No todas las estrellas mueren en esta explosión-implosión simultánea, pero se cree que las más masivas sí lo hacen. La explosión que acompaña a esta especie de suicidio es ciertamente notable. Durante un tiempo muy corto una estrella puede llegar a brillar más que toda una galaxia. Un suceso como éste, conocido con el nombre de *supernova*, fue observado por astrónomos orientales en 1054. Los restos de la estrella que explotó son todavía visibles formando una nube filamentosa de gas en expansión, conocida

como la nebulosa del Cangrejo, situada en la constelación de Tauro. Tal y como se esperaba, entre los gases de la nebulosa hay un pulsar, siendo la estrella de neutrones todo lo que queda del primitivo interior de la estrella.

Se estima que se producen unas tres *supernovas* por siglo en cada galaxia, si bien la última de la cual se tiene noticia en nuestra galaxia ocurrió en 1604. No se sabe cuántas de ellas producen agujeros negros en lugar de estrellas de neutrones, pero no sería sorprendente que fuera una proporción considerable. Parece, pues, razonable que, en los diez mil millones de años de vida de nuestra galaxia, se hayan formado millones de agujeros negros como resultado de la agonía de estrellas viejas.

Cuanto más pesada es una estrella mayor es la probabilidad de que llegue a formar un agujero negro, ya que se sabe por la teoría de la relatividad que un objeto colapsado de más de tres masas solares no puede evitar el convertirse en agujero negro. Cuando la estrella explota puede expulsar una parte considerable de su núcleo, de manera que las mejores oportunidades para los agujeros negros residen en las estrellas que inicialmente tengan diez o más masas solares. Se conocen muchas de tales estrellas. Además, las estrellas más pesadas son también las de vida más corta. El peso adicional origina una mayor compresión en el centro y por lo tanto mayores temperaturas y presiones para aguantar ese peso. Una temperatura mayor hace que el combustible nuclear se consuma más rápidamente. Una estrella de diez masas solares solamente vive cien millones de años. En consecuencia, la galaxia debería estar repleta de restos de tales objetos, muchos de los cuales iniciaron su ciclo de vida hace ya diez mil millones de años.

Todas estas consideraciones conducen a los astrónomos a pensar que los agujeros negros deben ser objetos comunes en la galaxia, en especial cerca del centro galáctico o en los cúmulos globulares donde hay una gran concentración de estrellas muy viejas. Pero ¿cómo pueden llegar a ser detectados?

Dado que un agujero negro no puede ser visto de forma directa, su detección depende de la observación de efectos secundarios. Como tiene la masa de una estrella, producirá una perturbación gravitatoria intensa sobre sus vecinas. Esto es especialmente patente para un agujero negro en los llamados sistemas binarios. Muchas de las estrellas de nuestra galaxia no viajan solas, sino en grupos de dos o incluso tres. Dos estrellas pueden estar juntas, sin caer la una hacia la otra, dando vueltas alrededor del centro de gravedad de ambas. Se sabe que los sistemas de estrellas binarias tienen períodos orbitales que van desde varias horas hasta varios años, dependiendo de la separación entre sus componentes.

Si uno de los miembros de un sistema binario muere formando un agujero negro, el otro seguirá dando vueltas de la misma manera, pero desde la Tierra parecerá como si la estrella diese vueltas alrededor de un espacio vacío. El agujero negro es demasiado pequeño para ser visto. Los astrónomos conocen la existencia de sistemas como éstos desde hace mucho tiempo, pero es necesario algún tipo de confirmación que asegure que el compañero invisible no es simplemente una estrella muy poco notable o una estrella compuesta de neutrones.

En los años 70, con el desarrollo de la astronomía por satélite, se empezaron a poseer tales medios de confirmación. Dado que el agujero negro gira alrededor de su estrella acompañante producirá en ella perturbaciones de marea debido a su intensa gravedad. Si el agujero se acerca mucho conseguirá arrancar material de la superficie de su compañera. Estos restos caerán hacia el agujero, pero la rotación orbital del sistema facilitará la formación de un torbellino gaseoso alrededor del agujero. El material más próximo al centro del torbellino es absorbido sistemáticamente por el propio agujero, como el agua que se va por el orificio de un lavabo. Al ir cayendo en espiral, el gas se calentará mucho; tanto, que no sólo brillará sino que también emitirá rayos X energéticos. A principios de los 70 los astrónomos iniciaron la búsqueda de emisión de rayos X en estrellas binarias con compañeros invisibles, utilizando satélites con telescopios de rayos X.

Pronto apareció un excelente candidato. Éste era el sistema conocido como Cygnus X-1, situado en nuestra galaxia en la constelación del Cisne. Con un telescopio óptico convencional los astrónomos solamente pueden ver una estrella denominada supergigante azul por ser de color azul (lo que indica que está mucho más caliente que el Sol) y de gran tamaño (mucho mayor que el Sol).

Estudiando el espectro de la luz de una estrella es posible deducir que está girando alrededor de un compañero invisible. Se llega a tal conclusión debido a que al dar vueltas la estrella supergigante alrededor de la invisible, a veces se mueve hacia nosotros y a veces se aleja, a una velocidad de unos 300 kilómetros por segundo. Cuando se acerca, las ondas de luz emitidas en su superficie se apelotonan un poco. Ya mencionamos este fenómeno, conocido como efecto Doppler, al principio del capítulo 3. La longitud de onda más

corta supone una frecuencia más elevada. En el caso de las ondas de luz la alta frecuencia se manifiesta en un pequeño cambio en el tono del color de la luz (un corrimiento hacia el extremo azul del espectro de colores). Por el contrario, una estrella que se aleja se vuelve un poco más roja al disminuir su frecuencia de luz. De esta forma, buscando una pequeña oscilación en el color de la supergigante azul, se pudo deducir que la estrella da una vuelta cada 5 días y medio alrededor de su compañero invisible. Además de la oscilación primaria, hay perturbaciones secundarias que se interpretan como debidas al arrastre del gas desde la supergigante hacia el objeto acompañante, de la forma que hemos explicado antes.

Desde un telescopio de rayos X en órbita, Cygnus X-1 parece una fuente brillante sencilla que fluctúa a longitudes de onda largas. Parece que de vez en cuando la supergigante se coloca frente a la fuente de rayos X y la eclipsa, lo cual sugiere que dicha fuente debe estar cerca de su compañero invisible. Si bien la fuente no pasa por detrás de la supergigante de forma exacta con respecto a nuestra propia línea de visión, parte del gas que sale de la estrella grande oscurece en ocasiones a la fuente de rayos X.

Todas estas observaciones hacen que parezca muy probable que la compañera oscura de Cygnus-1 sea un agujero negro o una estrella de neutrones. La única esperanza real de distinguir entre una u otra es pesándolas; las estrellas de neutrones no pueden ser más pesadas que unas pocas masas solares.

¿Cómo se puede pesar una estrella que está a muchos años luz de distancia? Hay varios métodos posibles, siendo el más directo la aplicación de las leyes del movimiento de los cuerpos en órbita, descubiertas originalmente por Kepler y explicadas por Newton. Los datos fundamentales que se necesitan para efectuar el cálculo son en primer lugar la velocidad orbital de la supergigante, en segundo lugar el tamaño de la misma y en tercero alguna información sobre la inclinación de las órbitas con respecto a nuestra línea de visión.

La primera parte de la información la proporciona el estudio del espectro de la supergigante: cuanto más rápidamente se mueva, mayor será la variación del color. El radio de la estrella se puede deducir conociendo su temperatura y su luminosidad, ya que podemos calcular cuánto brilla una determinada área de material a una temperatura dada. Sabiendo lo que brilla toda la estrella podremos calcular entonces su superficie y calcular así el radio de la estrella. La temperatura de la misma se deduce directamente de su color y su luminosidad se puede obtener midiendo lo brillante que es la estrella y teniendo en cuenta los efectos de la distancia. Evidentemente, cuanto más lejos esté la estrella más débil parecerá. Se puede medir la distancia por estimación de la cantidad de polvo interestelar que se interpone entre la Tierra y Cygnus X-1. Esto, a su vez, se calcula a partir del grado de enrojecimiento de la luz de la estrella supergigante debido a la absorción por el polvo (al igual que el Sol parece rojo cuando lo vemos en una atmósfera contaminada de polvo o neblina) comparándolo con el color calculado para esa temperatura y tipo de estrella.

Si bien esta clase de cálculos supone una cadena bastante compleja de razonamientos, es bastante rutinaria para los astrónomos y el resultado se trata con cautela, solamente debido a que lo que está en juego no es ni más ni menos que la existencia del objeto más extraño jamás predicho por la ciencia. El resultado de los cálculos es que el compañero oscuro de Cygnus X-1 tiene entre 8 y 18 masas solares, lo cual lo sitúa por encima de la clase de las estrellas de neutrones y perfectamente dentro de la familia de los agujeros negros. No obstante, habrá que esperar observaciones más detalladas para confirmar definitivamente su identidad.

Estas observaciones de estrellas binarias con rayos X han suscitado un gran interés y se ha realizado un gran esfuerzo teórico para estudiar las propiedades de las estrellas binarias con un agujero negro como miembro, utilizando modelos matemáticos y la ayuda de los ordenadores en los cálculos. Parece probable que el sistema comience con una estrella pesada y otra ligera. La pesada, por las razones ya explicadas, evoluciona más rápidamente que la ligera y llega a sus etapas finales, tal vez explotando como *supernova*, mientras que la otra sigue consumiéndose tranquilamente.

Antes de morir, la estrella ya sentenciada se dilata enormemente, llegando quizá incluso a engullir en ella a su compañera más ligera. Si esto ocurre así, la estrella ligera comienza a alimentarse a costa de la más pesada, absorbiendo el tenue material de su dilatada vecina. Esto puede continuar hasta que la estrella ligera se convierta en la más pesada, y viceversa. El núcleo de la estrella más dilatada (que se contrae mientras las capas exteriores se expansionan) colapsa formando un agujero negro y, si esto no produce una explosión de *supernova* lo suficientemente potente como para destruir completamente al sistema, el resultado será una estrella masiva normal en órbita alrededor de un agujero negro más ligero. Así pues, si bien las estrellas más pesadas evolucionan más rápidamente que las ligeras hacia un agujero negro como final, en un sistema

binario el resultado es al revés: una estrella pesada y un agujero negro ligero. Ciertamente, en las binarias de rayos X medidas hasta el presente, el objeto oscuro es más ligero que la estrella visible.

La evolución posterior del sistema, con la caída de gases desde la estrella hacia el agujero negro y la formación de un torbellino en forma de disco, no se conoce en detalle, a pesar del gran esfuerzo de investigación que se ha llevado a cabo al respecto. La estructura de semejante disco así es muy complicada –mucho más que por ejemplo un tornado en la Tierra, del cual se conoce poco todavía– y hay que tener en cuenta los efectos magnéticos así como fenómenos térmicos, gravitatorios y de dinámica de fluidos. Se ha discutido intensamente sobre si el disco es opaco o transparente, sobre si llega incluso a formarse, sobre el tiempo que puede durar y si tenderá a fraccionarse en anillos o en formas aún más complejas. Parece ser que el flujo de materia sobre el agujero no llegaría a durar ni siquiera un millón de años con la potencia que se necesita para producir una intensa fuente de rayos X. Probablemente no haya más que unos pocos centenares de sistemas como éstos en nuestra galaxia. No obstante, debe haber habido muchos miles que hayan atravesado por esta fase durante la vida de la Vía Láctea y ahora están desprovistos de su brillo X, tal vez con ambas estrellas componentes colapsadas. Se conoce al menos un sistema de este tipo, llamado PSR1913+16, si bien en este caso las dos estrellas parecen ser estrellas de neutrones.

Los dos escenarios que hemos descrito hasta el momento –la acumulación de millones de estrellas formando un cúmulo denso, y el colapso del núcleo de una estrella que ha agotado su combustible– requieren de unos conocimientos astrofísicos bastante bien establecidos y tienen consecuencias observacionales. El tercer escenario se fundamenta totalmente sobre la teoría matemática y predice unos agujeros negros que tal vez nunca lleguen a detectarse, pero debido a su estrecha relación con las singularidades desnudas consideraremos a continuación esta teoría.

Veremos detalladamente en el capítulo 8 que los astrónomos creen que el Universo empezó con una gran explosión hace unos quince mil millones de años. Durante la fase primitiva, el material cósmico del cual se formaron más tarde las estrellas, los planetas, etcétera, estaba extraordinariamente comprimido. Parece razonable pensar que en estas circunstancias parte de la materia densa se separara del resto y se agrupara formando agujeros negros. Sabemos que en alguna fase determinada se produjo la acumulación ordenada del material, ya que el Universo está lleno de galaxias individuales y perfectamente separadas. En estas condiciones de gran compresión en el Cosmos primitivo, podemos imaginar trozos de materia de todos los tamaños posibles colapsando bajo el efecto de su propio e irresistible peso.

Desgraciadamente, cualquier intento de analizar sistemáticamente el número y el tamaño de estos agujeros negros primitivos choca con serias dificultades relacionadas con nuestro desconocimiento de las propiedades del material cósmico primitivo. Hay diferentes opiniones sobre si era muy rígido o muy blando o un intermedio entre ambos, y sobre si empezó formando conglomerados y en tal caso de qué tamaño eran. Se ha argumentado que es posible que de la gran explosión surgieran agujeros supermasivos alrededor de los cuales se formaron posteriormente las galaxias mediante la lenta acreción de los gases más difuminados. Otros han propuesto que durante las primeras etapas se pudieran haber formado agujeros microscópicos, con masas de tan sólo unos mil millones de toneladas. Estos objetos son los que llegaron a tener grandes implicaciones en el tema de las singularidades desnudas. Como veremos en el próximo capítulo, un microagujero de mil millones de toneladas tendría un tamaño de tan sólo una diezbillonésima de centímetro, que es aproximadamente el tamaño de un núcleo atómico. Esto significa que su comportamiento estaría sujeto en parte a las exóticas leyes que gobiernan la conducta de los átomos, la llamada teoría cuántica. Las implicaciones de esto tendrían consecuencias muy profundas sobre la naturaleza del espacio y del tiempo.

Los astrónomos consideran muy seriamente la cuestión de los agujeros negros, a pesar de las exóticas propiedades de los mismos. Si bien sería prematuro decir que existen evidencias observacionales definitivas sobre los agujeros negros, sabemos que muchos objetos cuyas propiedades son compatibles con la presencia de un agujero negro, sin ser las explicaciones alternativas siquiera más plausibles que ésta. La existencia de las estrellas de neutrones y de los quasars enfrenta a la ciencia con la realidad de sistemas astronómicos extraordinariamente densos y compactos en los cuales la gravedad es tan fuerte que distorsiona seriamente la estructura del espacio y del tiempo. No hay evidencia de ningún mecanismo físico que diferencie claramente a los quasars y a las estrellas de neutrones de sus primos ligeramente más compactos, los agujeros negros. A menos que nuestra comprensión de la gravedad y del comportamiento de la materia esté muy equivocada, estamos ya a las puertas de obser-

var sistemas que han colapsado catastróficamente hacia su desaparición.

Dado que el tipo de campo gravitatorio que puede llegar a producir una contracción incontrolada formando un agujero negro existe por todo el Universo, se nos plantea la cuestión de si estos mismos campos gravitatorios podrían, una vez producido el colapso, originar no un agujero negro sino una singularidad que no vaya acompañada de su horizonte de sucesos, una singularidad desnuda. En el próximo capítulo pasaremos revista a lo que los físicos y los matemáticos han descubierto en lo que respecta al censor cósmico.

6. La singularidad desnuda al descubierto

Vimos en el capítulo anterior cómo los descubrimientos astronómicos de los años 60 y 70 nos ponían frente al fenómeno más radical y extraño de los encontrados en la historia de la ciencia: el catastrófico colapso gravitatorio. Cuando se produce el colapso hay dos resultados finales posibles: un agujero negro o una singularidad desnuda. Los agujeros negros tienen propiedades curiosas. No puede escapar nada de su interior; incluso la información queda atrapada. Pero las singularidades desnudas abren la posibilidad de situaciones aún más curiosas, tal como veremos a continuación.

La cuestión básica es la siguiente. Consideremos una estrella masiva que se acerca al final de su vida. Su núcleo gira a gran velocidad y por lo tanto presenta un gran abultamiento ecuatorial debido a la fuerza centrífuga. Está inmerso en el interior de un material caliente y turbulento y está a punto de iniciar la explosión de *supernova*, uno de los acontecimientos más violentos que le pueden ocurrir a la materia. La estrella explota y el núcleo colapsa. Al igual que en todas las explosiones, se produce un gran caos en el interior del remolino. En su colapso el núcleo sufre una gran distorsión y su velocidad de rotación se dispara al contraerse, por la misma razón por la cual un patinador sobre hielo gira más rápido cuando cierra los brazos sobre su cuerpo. La implosión del núcleo es, pues, asimétrica, turbulenta y caótica. ¿Qué es lo que ocurrirá? ¿Se formará un agujero negro o una singularidad desnuda?

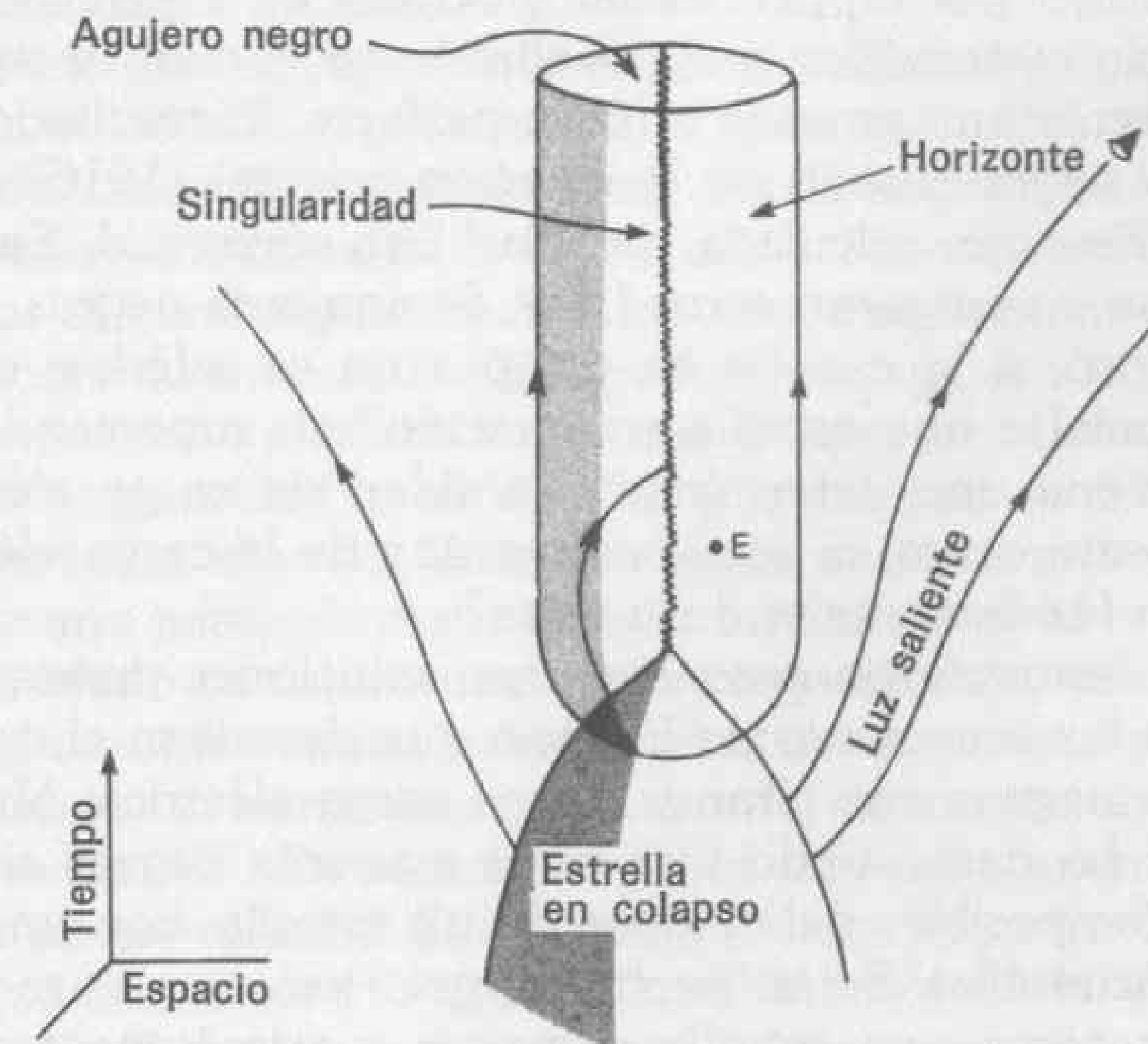
Es extraordinariamente difícil contestar a esta pregunta. Resulta imposible para los astronómos y los físicos elaborar modelos de la compleja situación en el interior de una *supernova*, con el detalle que sería de desear. Incluso los principios más generales presentan problemas. Todo lo que se puede hacer es examinar algunos mode-

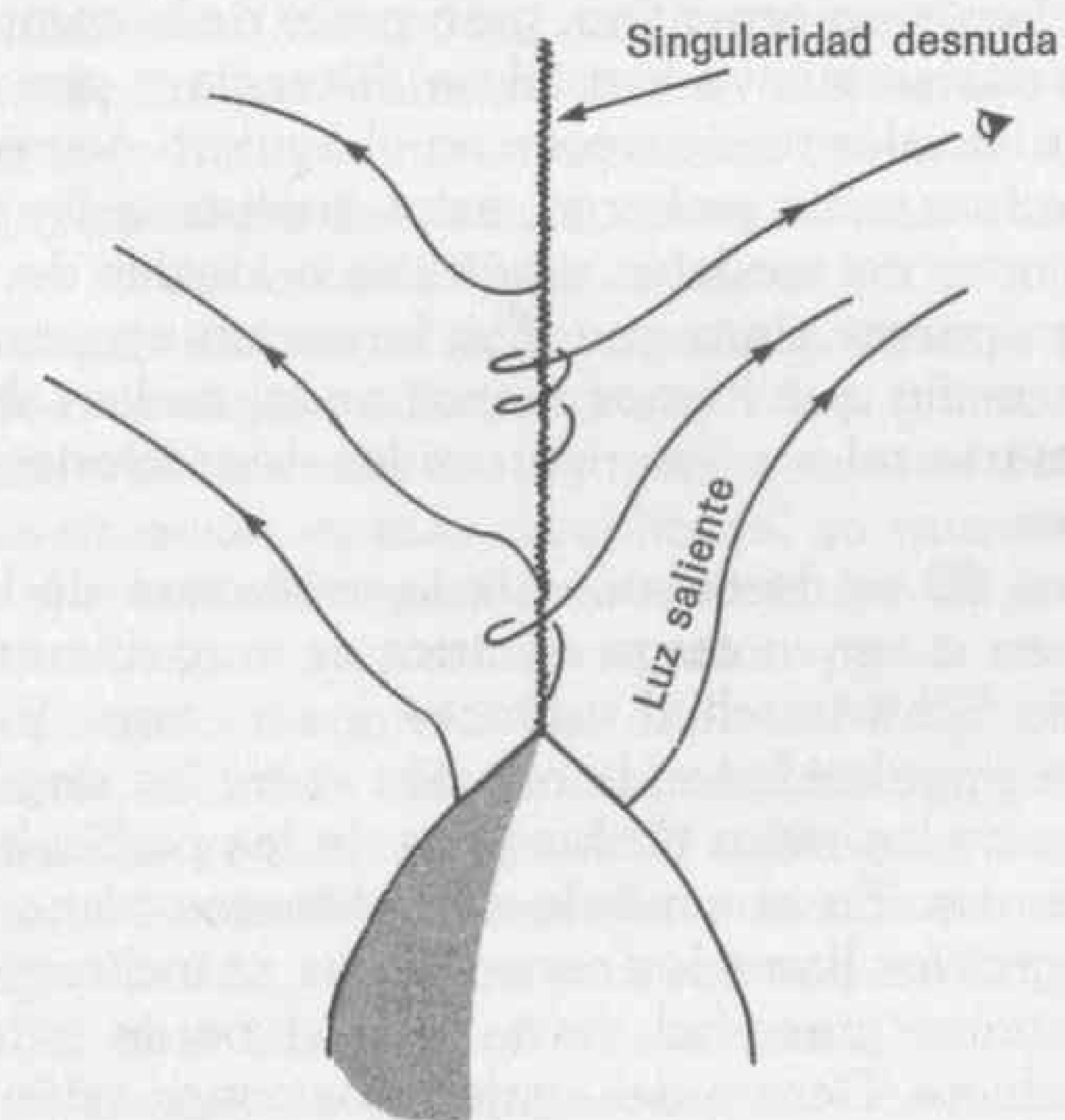
los matemáticos muy idealizados del colapso de un núcleo estelar e intentar determinar cómo actúa el censor cósmico. A falta de una demostración matemática completa de que el censor esconde siempre singularidades de esta clase en el interior de los horizontes de sucesos, los modelos no pueden probar nada si predicen que siempre se producirán agujeros negros, ya que no podemos asegurar que en situaciones más complejas o reales no lleguen a producirse singularidades desnudas. Igualmente, si un modelo idealizado predice una singularidad desnuda, antes de eliminar al censor cósmico debemos asegurarnos de que el propio modelo no sea tan idealizado como para resultar imposible en el mundo real.

Ambas alternativas, agujero negro o singularidad desnuda, están representadas en un diagrama de espacio-tiempo en la figura 36. En los dos casos una estrella colapsa hacia una singularidad final que se configura en los diagramas mediante una línea ondulada en el centro del colapso, línea que se forma en el momento en que la estrella se contrae hasta la nada. En la figura 36(i) la distorsión de los rayos de luz dobla a la luz saliente formando una superficie –el horizonte de sucesos– que oculta totalmente a la singularidad. Nada puede salir desde la región interna (el agujero negro) hacia el exterior a través de esta superficie tubular, de manera que el observador lejano no ve en absoluto los sucesos como el E, cercanos a la singularidad, ya que toda la luz de E (incluyendo la que se dirige hacia afuera) cae hacia la singularidad tal como se señala. Evidentemente el observador no puede ver la singularidad.

Por el contrario, en la figura 36(ii) se representa el colapso de una estrella formando una singularidad desnuda. Los rayos de luz (que pueden llegar a distorsionarse mucho, por ejemplo dando vueltas en espiral alrededor de la singularidad) pueden escapar lejos. No se forma ni un horizonte de sucesos ni un agujero negro y un observador puede mirar directamente a la propia singularidad.

Fig. 36. *Agujero negro y singularidad desnuda. (i)* Una estrella colapsa hasta una singularidad. La luz cercana no puede escapar al ser curvada por la gravedad. La luz que está más lejos escapa, no sin dificultad. La luz que "se queda" a una distancia fija de la singularidad forma una superficie tubular, llamada horizonte de sucesos, que tapa a la singularidad, evitando que sucesos como el E sean vistos por un observador lejano. Por lo tanto, la región interior del horizonte es negra, un agujero negro.
(ii) Si no se forma un horizonte, la luz puede escapar –tal vez en trayectorias enroscadas, curvadas y retorcidas debido a la intensa gravedad– y ser vista por un observador lejano. La singularidad está desnuda.





El primer estudio detallado del colapso estelar fue llevado a cabo, recordémoslo, por Oppenheimer y Snyder en 1939. Consideraron un modelo matemático muy idealizado en el cual se suponía que la estrella tenía una simetría esférica perfecta. El resultado final era un agujero negro basado en la solución original (1916) de las ecuaciones de Einstein, calculada por Karl Schwarzschild. En años que siguieron se investigaron otros tipos de agujeros negros. ¿Qué ocurrirá, se pensó, si la estrella en colapso no es esférica; qué le ocurre, en especial a una estrella en rotación? O, suponiendo que la estrella contiene una determinada cantidad de carga eléctrica, ¿desaparecerá esta carga, al ser la conversión de la carga eléctrica una de las leyes fundamentales de la física?

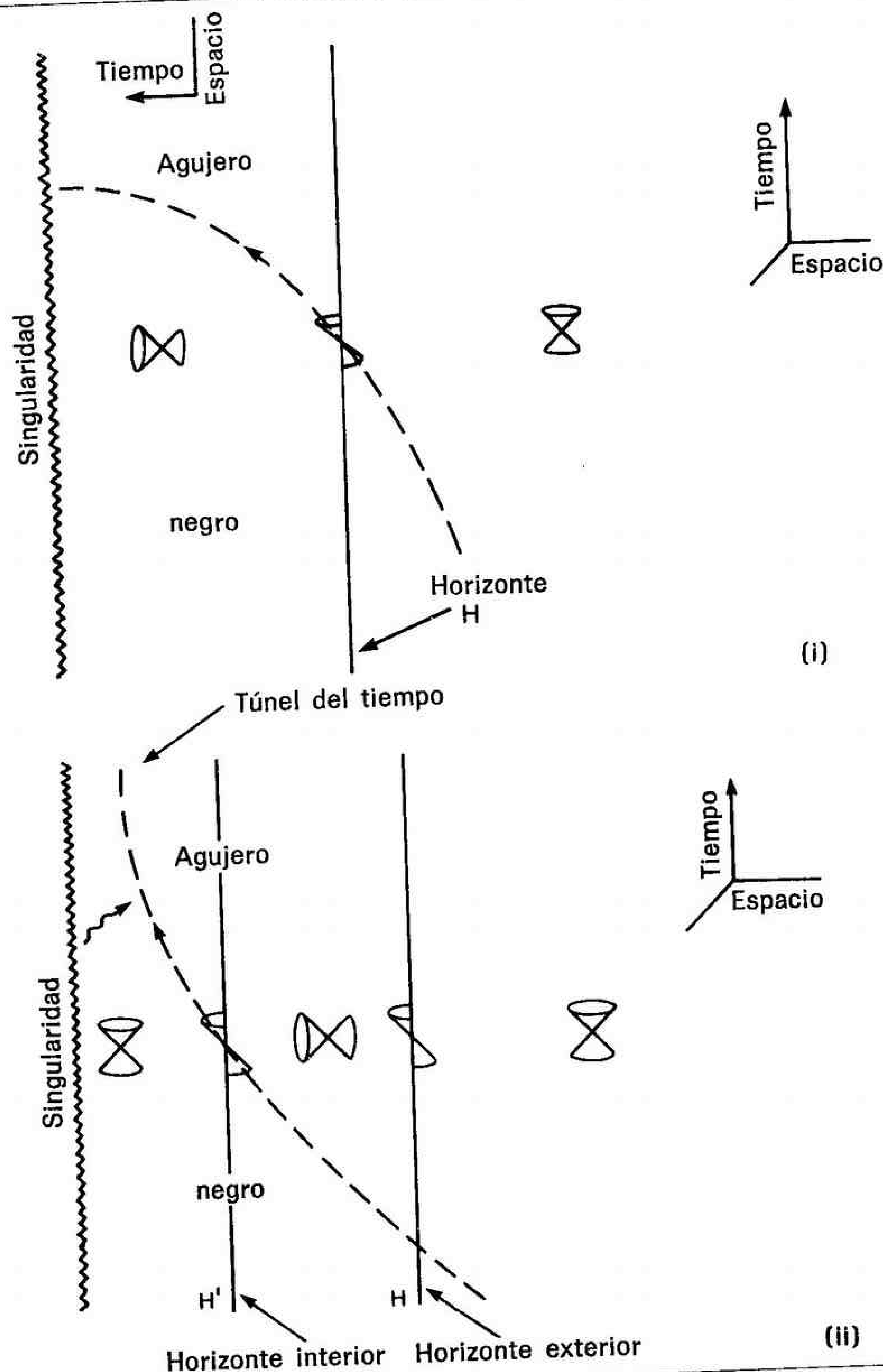
Los físicos descubrieron entonces unas soluciones matemáticas muy sencillas a las ecuaciones de Einstein que describen el exterior de los agujeros negros que giran y tienen carga eléctrica. Muy recientemente se ha demostrado que estos agujeros negros son los únicos resultados posibles del colapso de un estrella, con unos supuestos muy razonables. Se ha hecho un gran esfuerzo para tratar de comprender cómo una estrella compleja y asimétrica acabaría produciendo uno de estos sencillos agujeros negros. Se descubrió que, durante el colapso repentino, gran parte de la compleja estructura de la estrella se vuelve invisible a distancia y por lo tanto las irregularidades iniciales no aparecen en el agujero negro final cuando se ve desde fuera. Sin embargo, estos análisis se limitaban a pequeñas variaciones de modelos simétricos e ideales de estrellas en colapso. Si bien parece claro que *si* se forma un agujero negro éste será del tipo sencillo que hemos mencionado, nadie sabe si llegará siquiera a formarse tal agujero negro si las desviaciones de la simetría son grandes.

En los años 60 se descubrió que la estructura de los agujeros negros que giran o tienen carga eléctrica es muy diferente de la de los agujeros de Schwarzschild esféricos y sin carga. Si bien todos ellos contienen singularidades, la relación entre las singularidades y las trayectorias de los rayos de luz y las de las partículas que caen son muy diferentes. En el capítulo 4 explicamos cómo se produce un agujero negro: los llamados conos de luz se inclinan lentamente debido a la intensa gravedad, hasta que el borde exterior ya no apunta hacia afuera. Dentro del agujero los conos están totalmente inclinados hacia adentro, de manera que toda la luz, incluso la dirigida hacia afuera, es atraída hacia el interior y, en el caso de Schwarzschild (sin rotación y sin carga), todas las partículas materiales se ven atraídas hacia el centro geométrico donde se halla la singularidad.

Todo esto se representa esquemáticamente en la figura 37(i). La singularidad está representada, al igual que antes, por una línea ondulada. Lejos de la singularidad, donde la gravedad es débil, los conos están verticales, de la forma usual. Pero a medida que nos acercamos al centro gravitatorio, los conos se inclinan hasta que en el horizonte de sucesos H (la superficie del agujero negro) el borde exterior del cono alcanza la vertical. Dentro de H, el cono apunta hacia la singularidad, y toda la luz y la materia se dirigen inexorablemente hacia ella. (La línea quebrada muestra una posible trayectoria de una partícula material o de un observador.)

Cuando se coloca una cierta carga eléctrica en el agujero, la situación cambia radicalmente, como se ve en la figura 37(ii). Sigue existiendo un horizonte de sucesos H, donde los conos de luz están inclinados 45°. En el interior de H hay un agujero negro del cual nada puede escapar. Sin embargo, ahora hay otra clase de horizonte, que llamamos H′, situado en el interior de H. Entre H y H′ los conos de luz están más o menos horizontales, y la luz y la materia se ven atraídas hacia el interior. Pero cuando se llega a H′ ocurre algo extraordinario: los conos vuelven a ponerse verticales y las trayectorias de las partículas se curvan alejándose de la singularidad. Si bien ni la luz ni la materia pueden curvarse tanto como para salir del agujero negro (es decir no pueden atravesar H hacia el exterior), ya no se ven atraídas forzosamente hacia la singularidad. Es como si hubiera una especie de repulsión interna alrededor de la singularidad que alejara a la materia que cae (y a los observadores). Algo parecido ocurre con un agujero negro en rotación, pero en este caso la situación es más complicada, ya que no es esférico, de forma que el resultado depende de la dirección de la caída.

Si un observador que cae es repelido por la singularidad, pero no puede escapar del agujero, ¿a dónde va? Es posible deducir, matemáticamente, a dónde conduce el espacio-tiempo, y el resultado es asombroso. La región interior de H′, alrededor de la singularidad, es una especie de túnel temporal que conduce a otro Universo, con agujero negro y todo, algo que podríamos describir como un agujero blanco del cual emergerá el observador. Ya mencionamos este resultado en el capítulo 4, y hacíamos notar que un observador podía caer de nuevo en el agujero, sólo para salir ya a otro Universo y así sucesivamente, *ad infinitum*. Por lo tanto debemos considerar al agujero cargado o en rotación, o ambas cosas, como una infinidad



de Universos, de tal manera que la salida de cualquier Universo excluye el retorno al mismo.

Aparte de esta propiedad absurda, estos agujeros negros tienen otra característica problemática. En el caso del agujero de Schwarzschild (figura 37[i]) no se puede observar la singularidad, ni siquiera por un observador que estuviera en el interior, ya que los conos de luz están totalmente inclinados. Esto quiere decir que la singularidad está siempre en el futuro del observador, hasta que llegue a ella. No hay ninguna posibilidad de información o influencia que pueda abandonar la singularidad y llegar a él. Por el contrario, el observador que está dentro de H', el horizonte interior del agujero negro cargado o en rotación, o ambas cosas, puede examinar la singularidad desde tan cerca como quiera, ya que la misma se halla tanto en su futuro como en su pasado. Las influencias pueden viajar desde la singularidad hasta él. Para el observador situado dentro del horizonte interior la singularidad está desnuda.

¿Ha fallado el censor cósmico? Desde luego, es cierto que la singularidad sólo está desnuda para alguien que esté lo suficientemente loco para saltar dentro del agujero negro. El resto del Universo está muy tranquilo, sabiendo que cualesquiera que sean los horrores que salgan de la singularidad, no pueden llegar a traspasar el horizonte H. La verdad sobre la singularidad está, por así decirlo, censurada para el público en general. Sólo mediante una entrada especial para el selecto "club del agujero negro" se puede llegar a conocer esta verdad. Pero entonces no hay retorno; la pertenencia y asistencia al club son para siempre.

El problema en desechar de esta manera la singularidad desnuda estriba en que estamos ante cuestiones de principio. La división del espacio-tiempo en "el agujero negro" y "el resto del Universo" es bastante arbitraria. Supongamos, por ejemplo, que el agujero ne-

Fig. 37. *(i)* El horizonte de sucesos que rodea a un agujero negro sin carga ni rotación se forma cuando los conos de luz cercanos a la singularidad se inclinan hacia ella. La dirección del tiempo con relación al espacio también se inclina: ahora la singularidad está en el futuro. El observador que cae (línea quebrada) no puede ver la singularidad hasta que llega a ella.

(ii) Si el agujero está cargado o en rotación, los conos se inclinan en sentido contrario cerca de la singularidad. Por lo tanto, hay un horizonte interior H' aparte del horizonte H (exterior) normal que forma la superficie del agujero negro. El observador que cae es repelido por la singularidad a lo largo del "túnel del tiempo". La luz que proviene de la singularidad (línea ondulada) puede llegar a él: la singularidad está desnuda.

gro fuera tan grande que abarcara todo nuestro Universo observable. Esto no es una idea totalmente descabellada y en realidad puede que se aproxime a la verdad (véase capítulo 8). Incluso si éste no es el caso, podríamos imaginarnos (por mucho que cueste creerlo) la idea de una sociedad supertecnológica que convirtiera toda la galaxia en un agujero negro. Podríamos entonces entrar tranquilamente en el agujero negro sin notar de momento nada excepcional y después, evidentemente, presenciaríamos la singularidad totalmente desnuda.

La perspectiva de una singularidad desnuda en el interior de un agujero negro o en rotación ha llevado al general convencimiento entre los físicos de que, en la práctica, el interior del agujero no sería tal como lo hemos dibujado en los diagramas esquemáticos de la figura 37. Ya dijimos antes que exteriormente todos los agujeros negros son, casi con seguridad, de una clase muy sencilla. A pesar de que el interior no sea necesariamente sencillo. Las características de las que hemos hablado, en particular el túnel del tiempo hacia otros Universos y la desnudez de la singularidad, aparecen en realidad en modelos simplificados, pero no está nada claro que ocurran en el caso real del colapso gravitatorio. El motivo de esto tiene que ver con la naturaleza del horizonte interior H'. Dijimos en el capítulo 3 que el tiempo transcurrido para un observador no es necesariamente el mismo que el que experimenta otro observador que se mueva de manera diferente. En particular, como vimos en el capítulo 4, un observador que caiga en un agujero negro tardará, en su propio sistema de referencia, un tiempo finito para llegar a él (un tiempo muy corto, quizás menor que un segundo, si cae desde un lugar suficientemente próximo). Pero un observador lejano verá que la misma secuencia de sucesos tarda un tiempo infinito. Por lo tanto, en este sentido el interior del agujero negro está, para un observador exterior, más allá de cualquier instante futuro.

Observando cómo se desajusta el tiempo para un observador que caiga en un agujero en rotación o cargado observamos, a medida que se va acercando al horizonte *interior* H', un fenómeno extraordinario. Durante la breve duración de su paso a través del horizonte podrá presenciar, mirando hacia afuera, la totalidad de la historia del Universo, hasta el futuro infinito, transcurriendo en ese efímero instante. Todo lo que llegará a suceder alguna vez está comprimido en el instante final durante el cual cruza el horizonte interior. Esto quiere decir que toda la información, y en particular toda la luz gracias a la cual ve el Universo exterior, estará infinitamente

comprimida en el tiempo. En un instante aparecerá en el horizonte una infinita cantidad de luz. Aparte de pulverizar al observador, la energía de esta luz ejercería su propia gravedad, ya que la energía, al igual que la materia, es una fuente de gravedad. Al ser infinita, la energía crearía otra singularidad en todo el horizonte interior H', y el observador chocaría con ella y desaparecería antes de llegar a ver nunca la singularidad desnuda. Por lo tanto, la región en el interior de H', y claro está los misteriosos "Universos" correspondientes, no podrán ser nunca alcanzados. El túnel del tiempo está cerrado. De hecho no existe, ya que las dos singularidades se aúnan destruyéndolo. El censor cósmico ha ganado. Evidentemente, esta conclusión depende del supuesto de que todavía haya luz en el Universo en el futuro remoto.

Pero todavía hay otra manera de que se origine una singularidad desnuda. El tamaño de la zona del "túnel" dentro del horizonte H' depende de la cantidad total de carga eléctrica o de rotación del agujero. Una pequeña cantidad produce un túnel muy estrecho cerca de la singularidad, pero cuanta más cantidad se añada más crecerá la zona. Un cálculo matemático sencillo muestra que si hay suficiente carga eléctrica o suficiente rotación, el horizonte interior H' se alejará tanto que alcanzará al horizonte exterior, el horizonte de sucesos H. Por tanto, cualquier posterior adición de carga eléctrica, o cualquier incremento en la velocidad de rotación haría desaparecer totalmente los horizontes, dejando a la singularidad al descubierto ante todo el Universo.

De entrada, podría parecer que estas consideraciones abren la perspectiva de que cualquiera podría crear deliberadamente una singularidad desnuda tomando un agujero negro y arrojando en su interior más y más carga eléctrica o haciéndolo girar más y más rápidamente, por ejemplo, arrojando partículas en dirección oblicua. Por otra parte, podemos imaginar que colapse una estrella con mucha carga o en rotación muy rápida hasta una singularidad desnuda en lugar de un agujero negro. Esto parece de lo más plausible cuando se efectúan cálculos realistas. En el caso de la rotación, la velocidad crítica, a partir de la cual el agujero negro se convertirá en una singularidad desnuda, es alrededor de unas cien mil vueltas por segundo para un agujero de una masa solar. Este valor puede parecer increíblemente grande (de hecho la superficie del agujero giraría, por así decirlo, tan rápida como la luz), pero no es así. El Sol gira una vez cada 25 días. Si colapsara en su totalidad, al llegar al tamaño de un agujero negro, o sea de unos pocos kilómetros de diámetro, su

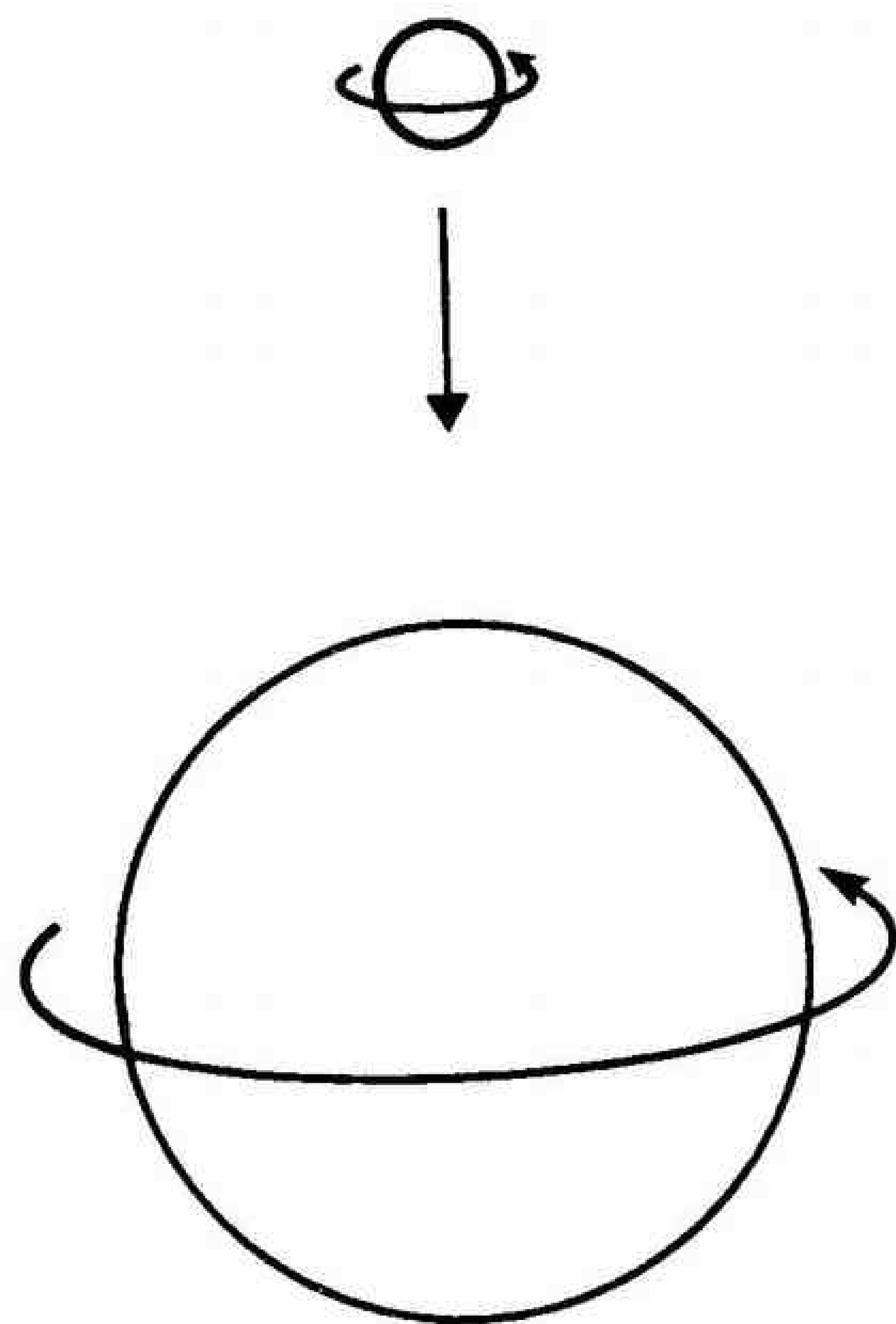


Fig. 38. *Cómo aumentar la rotación de un agujero negro.* Se deja caer un cuerpo que gire sobre sí mismo al interior del agujero en rotación de forma que incremente la velocidad de rotación de éste. Sin embargo, la gravedad adicional del cuerpo utilizado sobrepasa la ganancia en la rotación.

velocidad de rotación (por el principio del "patinador sobre hielo") se incrementaría un billón de veces. Giraría demasiado rápido para que se formara un agujero negro.

¿Quiere esto decir que el colapso gravitatorio del Sol originaría una singularidad desnuda? Ello sería imposible por el siguiente motivo. A medida que el Sol se fuera contrayendo y creciera su velocidad de rotación, la fuerza centrífuga en su ecuador crecería más y más hasta llegar a un punto en el que incluso la creciente gravedad en la superficie de la masa en contracción sería incapaz de retener al material de la periferia. Las distorsionadas regiones ecuatoriales serían materialmente lanzadas al espacio, llevándose con ellas mucha energía de rotación. Los cálculos matemáticos muestran que la condición para que se forme un agujero negro corresponde a la condición de que la fuerza centrífuga sea menor que la fuerza de

atracción gravitatoria. Por lo tanto, el Sol en contracción iría expulsando material hasta que su velocidad de rotación disminuyera hasta el valor en el cual se formaría un agujero negro y no una singularidad desnuda. El censor cósmico ha vuelto a ganar.

Algo similar ocurre con la carga eléctrica. Una bola de materia eléctrica experimenta una fuerza de gravedad que intenta contraerla y una fuerza eléctrica repulsiva que intenta hacerla estallar. La condición para que se forme un agujero negro en lugar de una singularidad desnuda es que la repulsión eléctrica no supere a la atracción gravitatoria. En consecuencia, para que se origine una singularidad desnuda a partir del colapso gravitatorio de una bola de materia muy cargada se tiene que conseguir una bola en la cual la repulsión eléctrica supere a la atracción gravitatoria. Pero en tal caso la bola tendería a expansionarse en lugar de contraerse. El colapso de todos modos tampoco tendría lugar.

Si bien los efectos de la rotación y de la carga eléctrica son de tipo repulsivo, se podría imaginar un escenario alternativo. En lugar del colapso de una estrella cargada o en rotación, podríamos empezar con un agujero negro cargado o en rotación, e ir aumentando los valores de estas cantidades hasta superar el límite a partir del cual no puede existir un agujero negro. Podría ser, entonces que de esta manera el agujero negro se "transformara" en una singularidad desnuda.

Supongamos que el agujero girara tan rápidamente que estuviera cerca del límite en el cual el horizonte de sucesos desaparecería y la singularidad quedaría al descubierto. ¿Cómo podríamos aumentar, aunque sólo fuera ligeramente, la velocidad de rotación? Un método consistiría en arrojar al interior del agujero, en la dirección del eje de rotación del mismo, un cuerpo que girara, de manera que suministrase una rotación adicional al agujero (véase figura 38). Esto aumentaría la velocidad de giro del mismo, pero también lo haría más pesado, incrementando por lo tanto su poder gravitatorio. Cuando se investiga en detalle la situación, resulta que el incremento gravitatorio compensa con creces el incremento "centrífugo". El valor crítico de la rotación necesaria para producir una singularidad desnuda crece más deprisa que el incremento real que se adquiere con el cuerpo que arrojamos.

La estrategia más favorable consistiría en depositar la mayor cantidad de rotación con la menor cantidad de masa posible, ya que ello produciría el mayor incremento de fuerza centrífuga a expensas de la menor gravedad adicional posible. Una buena posibilidad sería

utilizar un fotón de luz en lugar de un cuerpo material. Los fotones tienen una cierta rotación (aunque pequeña) y una cierta energía, que se sumaría a la masa del agujero. Pero la rotación del electrón es siempre la misma, mientras que la energía disminuye al aumentar la longitud de onda. Si tomamos fotones de longitud de onda cada vez mayor, disminuiremos la energía tanto como queramos. Este hecho parece que nos proporciona la posibilidad de crear una singularidad desnuda, ya que solamente habría que ir arrojando al interior del agujero, en la dirección de su eje de rotación, fotones de longitud de onda muy larga. No obstante, la naturaleza (a modo de censor cósmico) nos sale al paso. Cuando se hacen los cálculos para determinar la longitud de onda que deben tener los fotones para que el agujero adquiera más rotación que masa-energía (y por tanto gravedad), el resultado llega a ser sorprendente. La longitud de onda debería ser al menos tan grande como el propio agujero negro. Desgraciadamente, una onda tan grande no penetrará fácilmente en el agujero, sino que tenderá más bien a dispersarse hacia el exterior del mismo e ir a otra parte.

Los mismos problemas se presentan si se intenta cargar un agujero negro por encima del valor crítico a partir del cual desaparece el horizonte de sucesos. Si el agujero tiene ya mucha carga, cualquier carga adicional deberá vencer la fuerza eléctrica. Si esta carga adicional se arroja al interior del agujero, proporcionándole una gran velocidad, la energía suplementaria que se le suministra para que pueda entrar incrementa la masa del agujero (y por tanto su gravedad) en mayor medida que lo que la carga incremente la fuerza eléctrica. Una vez más gana el censor cósmico.

Es posible que el lector tenga la impresión de que no hay manera de que se forme una singularidad desnuda a partir del colapso gravitatorio de un cuerpo. No obstante, hay modelos matemáticos que sugieren cómo pueden llegar a formarse las singularidades desnudas. Uno de estos modelos lo descubrió E. P. T. Liang, de la Universidad de Texas. Liang consideró el colapso de un cilindro de materia infinitamente largo rodeado por el espacio vacío. Este sistema colapsará hasta una singularidad desnuda de densidad infinita, pero el material no estará concentrado en un solo punto. En su lugar, el cilindro se contraerá transversalmente, hasta una línea infinitamente larga de densidad infinita, una singularidad lineal.

Si bien no se pone en duda este resultado, la pregunta que se presenta es si los cálculos de Liang son realistas o no. ¿No sería posible que un cilindro muy largo, pero al fin y al cabo finito, se comportara de forma diferente que el modelo idealizado de un cilindro infinitamente largo? Tal vez cuando se tengan en cuenta los efectos de las ondas gravitatorias que salen del cilindro en colapso la singularidad quede tapada por un horizonte de sucesos y en consecuencia desaparezca en un agujero negro. No se conoce la respuesta, pero incluso si se supiera, aún quedaría el problema de extraer conclusiones a partir de un modelo matemático idealizado, como veremos en el ejemplo de un caso similar.

Imaginemos que colocamos un lápiz cilíndrico con una punta perfectamente afilada, verticalmente sobre una superficie horizontal. Esto se puede lograr fácilmente colocándolo sobre su extremo plano (véase figura 39). El estudio matemático del problema nos muestra que ésta es una solución posible. El lápiz no caerá debido a que su forma cilíndrica es simétrica. No hay motivo alguno para que caiga en una dirección y no en otra. Pero hay una situación alternativa completamente simétrica que corresponde a colocar el lápiz en equilibrio sobre su punta. También hay una simetría perfecta y por lo tanto el lápiz no debería caer.

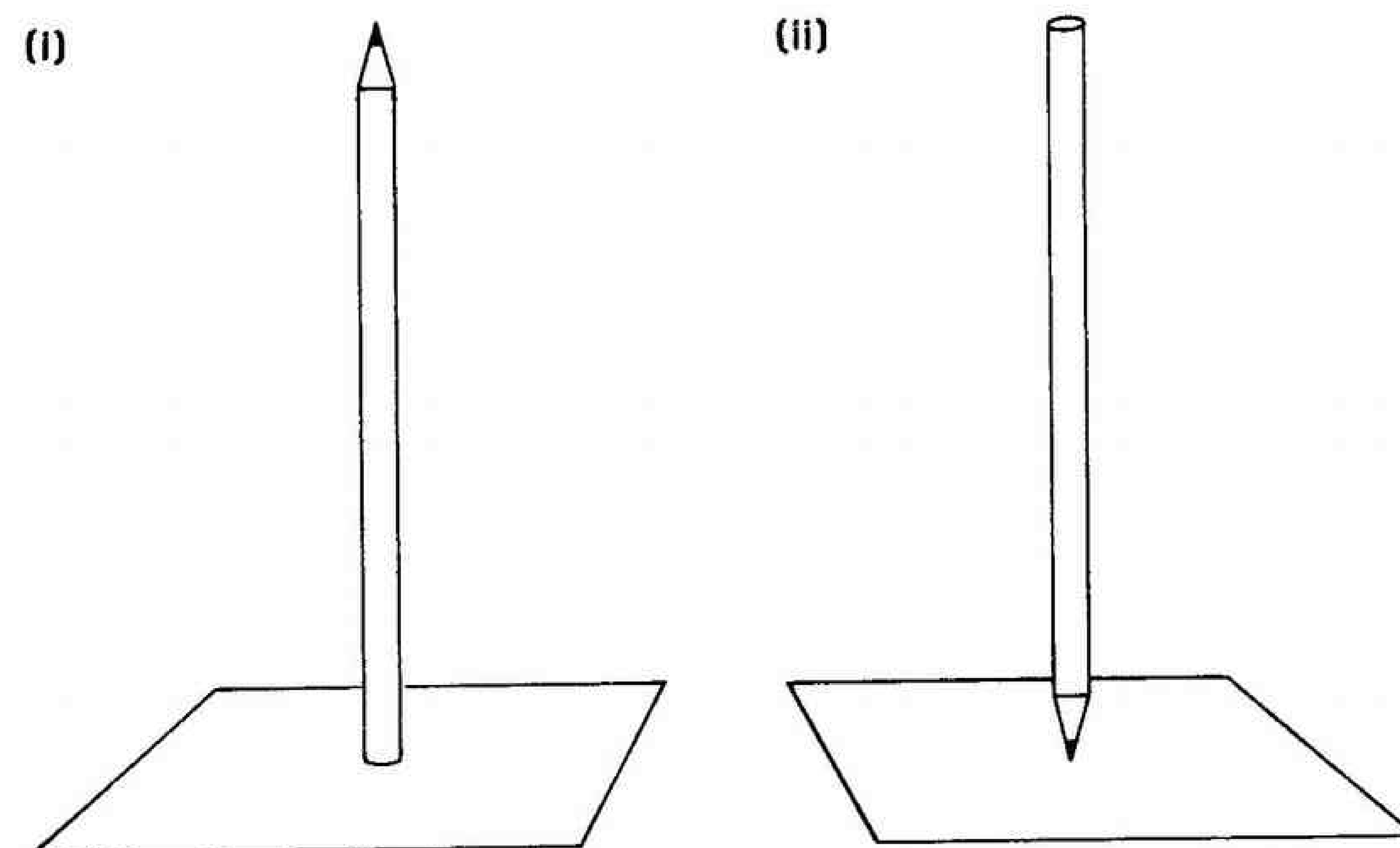


Fig. 39. *Estabilidad. (i)* El lápiz apoyado sobre su extremo plano está en una situación razonablemente estable.
(ii) Cuando lo apoyamos sobre su punta afilada, el lápiz no permanecerá vertical, aunque matemáticamente se pueda describir esta situación.

En este segundo caso el sentido común nos dice que el lápiz se caerá. Si bien un matemático podría predecir una situación en la cual el lápiz estaría equilibrado sobre su punta, sabemos que en la práctica esto no puede ocurrir (a menos que la punta estuviera muy aplastada). Un estudio matemático más general revela por qué una solución (el lápiz sobre el extremo plano) es realista mientras que la otra (el lápiz sobre la punta) no lo es. El motivo tiene que ver con la cuestión de la estabilidad. Cuando está sobre el extremo plano podemos hacer caer el lápiz fácilmente con un pequeño golpe, pero mientras la perturbación extrema sea razonablemente pequeña permanecerá en equilibrio. De igual manera, si el lápiz no es exactamente cilíndrico sino que su superficie tiene pequeñas irregularidades, el equilibrio no será perturbado, a no ser que estos efectos sean muy importantes. Decimos que el lápiz está en equilibrio estable cuando reposa sobre su extremo plano.

Por el contrario, el lápiz colocado sobre su punta está claramente en equilibrio inestable. Cualquier pertubación externa o cualquier desviación de la estricta simetría cilíndrica, por pequeña que sea, desequilibrará al lápiz (suponiendo que su punta esté perfectamente afilada). Por lo tanto, la solución matemática que describe al lápiz en esta configuración inestable no tiene ningún efecto práctico como descripción del mundo real. Es solamente una idealización sin ninguna correspondencia con la realidad. Estas consideraciones indican que debemos ir con cuidado al extraer conclusiones sobre el mundo real a partir de modelos matemáticos idealizados. A veces funcionan y a veces no.

Para decidir si hay que considerar seriamente el modelo de Liang, o cualquier otro, debemos considerar pequeñas desviaciones de la simetría y de otros aspectos del modelo y ver si se mantiene la singularidad desnuda. Si ello no es así, la victoria sobre el censor cósmico estará vacía de contenido. Desgraciadamente, la teoría general de la relatividad es tan compleja que un estudio completo de la estabilidad de la singularidad desnuda de Liang supondría una tarea inmensa.

Otro modelo matemático de singularidad desnuda es el propuesto por H. Muller zum Hagen y sus colegas de la Universidad de Hamburgo. Contemplan el caso de un colapso esférico de una clase muy especial. En su modelo, las capas externas de una bola de material en colapso inician una implosión más rápida que las capas internas, con el resultado de que la bola intenta, por así decirlo, pasar de dentro afuera y viceversa. En algún punto las capas externas cruzan y adelantan a las internas. Si esto ocurre de una manera determinada se originará una capa de densidad infinita, que dará origen a una singularidad desnuda, no en el centro de la bola sino en el punto de cruce de las capas.

Se ha criticado a este modelo por varios motivos. Por ejemplo, los autores suponen que la bola de materia no ejerce presión, que de otra forma rompería el sistema cuando la densidad del material se hiciera infinitamente elevada, si bien incluso este punto no está del todo claro.

Otro ejemplo de un modelo matemático que predice una singularidad desnuda se debe a M. Demianski y J. P. Lasota. Los autores consideran un cuerpo esférico que colapsa de forma normal, pero ahora éste emite luz, o cualquier otra radiación, de forma tal que la masa de la "estrella" va disminuyendo a un ritmo apreciable. Ahora bien, el radio del agujero negro esférico es proporcional a su masa, de manera que si la estrella pierde masa aumenta el grado de contracción que deberá experimentar para convertirse en un agujero negro. Con un flujo de energía suficiente se puede conseguir que este radio crítico para la formación del agujero decrezca más rápidamente que la propia "estrella". La bola de materia sigue su colapso, hasta radio cero, sin cruzar nunca el horizonte de sucesos necesario para formar un agujero negro. El resultado final es una singularidad desnuda, pero sin masa, ya que toda ella ha sido emitida. En el próximo, y último, ejemplo, veremos un resultado similar.

En un agujero negro la singularidad está rodeada por un horizonte de sucesos que impide que aquélla sea vista desde el exterior. Se puede considerar al propio horizonte de sucesos como el límite del agujero negro. El radio del horizonte es, como ya hemos dicho, proporcional a la masa del agujero negro en el caso de Schwarzschild. Si pudiéramos encontrar alguna forma de disminuir la masa del agujero, entonces éste se contraería, el horizonte se encogería y se acercaría a la singularidad. Si este proceso pudiera proseguir hasta haber extraído toda la masa del agujero, entonces el horizonte se contraería hasta la nada y la singularidad quedaría al descubierto.

Hacia 1970 muchos físicos comenzaron a investigar sobre la posibilidad de extraer masa (y por tanto energía) de los agujeros negros. Roger Penrose descubrió un posible mecanismo. Cuando un agujero negro está en rotación, establece una especie de torbellino invisible cuyo efecto arrastra hacia él a los cuerpos en caída (incluso a la luz). Este efecto puede ser muy pronunciado cerca del horizonte de sucesos. Cuando un cuerpo cae en un agujero negro que no

gira, al llegar al horizonte de sucesos está cayendo, en cierto sentido, a la velocidad de la luz. Si el agujero está en rotación, entonces, además de su caída radial, la partícula adquirirá también cierta velocidad transversal. En consecuencia, es posible que estas dos velocidades –la de caída radial y la de arrastre lateral– se combinen produciendo una velocidad neta superior a la de la luz. La partícula, que está todavía fuera del horizonte, viaja, en cierto sentido, más rápidamente que la luz con respecto a un observador que diste mucho del agujero.

La región en la parte exterior del horizonte donde ocurre este extraño efecto ha sido bautizada como "la ergosfera", y tiene algunas propiedades peculiares. Una partícula puede moverse en la ergosfera con menor energía que la que tendría a gran distancia, incluida la energía propia de su masa. Por lo tanto, esta partícula tendrá masa-energía negativa, como la cavorita del capítulo 4. Sin embargo, esta energía negativa es un efecto global, es decir, no es una propiedad localizada en la partícula, sino en el sistema como un todo. Un observador cerca de la propia partícula no notaría nada anormal.

No obstante, como observó Penrose, esta masa negativa se puede utilizar para reducir la masa del agujero negro y en consecuencia extraer energía del mismo. La forma en que esto podría suceder sería la caída de una partícula normal (es decir, de masa positiva) en el interior de la ergosfera. Como la masa-energía se conserva siempre, seguirá teniendo masa positiva mientras esté en la ergosfera. Por otro lado, si durante su viaje la partícula explotara en dos trozos, entonces sería posible que uno de estos trozos cayera siguiendo una de las órbitas de masa negativa. Cuando el trozo cae al interior del agujero, reduce la masa del mismo. La energía que se libera aparece en el fragmento restante, el cual es emitido desde la ergosfera de vuelta al espacio con una mayor masa-energía que la que tenía al principio la partícula original.

A primera vista podría parecer que, siguiendo con este proceso, se podría reducir la masa del agujero negro hasta cero, quedando la singularidad al descubierto. Pero de nuevo entra en acción el censor cósmico. Por cada cantidad de masa que se extraiga, disminuirá también la rotación del agujero en una parte. Esto hará que la ergosfera se contraiga, de manera que cada vez es más difícil que se produzca el proceso de Penrose. Al final desaparecerá la ergosfera y con ello se perderá la oportunidad de extraer más energía. El agujero quedará con una gran parte de la masa original.

Stephen Hawking llevó a cabo algunas investigaciones muy generales y demostró un importante teorema sobre la cantidad de energía que se puede extraer de los agujeros negros mediante cualquier procedimiento. Básicamente, el teorema dice que cualquier cosa que se haga con un agujero negro hará que éste crezca, en el sentido de que el área total del horizonte de sucesos se hará cada vez mayor. Así, aunque el proceso de Penrose saca masa del agujero, no lo hace menor, lo cual era nuestro objetivo original. El motivo es que el radio del horizonte de sucesos que rodea al agujero en rotación no es solamente proporcional a la masa, como en el caso sin rotación (es decir, Schwarzschild), sino que depende, de forma complicada, de la masa y de la velocidad de rotación (de hecho no es ni siquiera esférico). Cuando se añade la carga eléctrica, la fórmula es aún más complicada. Durante el proceso de Penrose, tanto la masa como la rotación disminuyen, y siempre de manera tal que el área del agujero crece en lugar de disminuir.

El teorema del área de Hawking se aplica también a muchos otros procesos. Por ejemplo, si chocan dos agujeros negros, caerán el uno en el interior del otro y se fundirán. El teorema nos dice que al final del proceso, el área del agujero negro resultante será siempre mayor que la suma de las áreas de los dos agujeros originales. En consecuencia, por medio de choques de agujeros negros no podemos hacer menor a ninguno de ellos.

El teorema de Hawking se basa en dos supuestos fundamentales. En primer lugar, que las singularidades desnudas no existen y, en segundo lugar, que la energía y la masa siempre son positivas. El resultado tiene una íntima relación con una ley fundamental de la física –la segunda ley de la termodinámica– tal como se discute en mi libro *El Universo desbocado*– que en una de sus formulaciones establece la imposibilidad del llamado *perpetuum mobile*. Este proyecto supondría un medio de reutilizar la energía degenerada; por ejemplo, cuando el fuego ha disipado calor en su entorno, la energía está allí todavía, pero de forma desordenada e inutilizable. La segunda ley nos impide la reutilización de la misma sin que para conseguirlo sea necesario gastar al menos tanta energía como la que pudiéramos extraer. Durante mucho tiempo estuvo de moda entre los inventores el intento de violar esta ley y hallar una máquina que funcionara siempre sin necesidad de combustible. Si existen las singularidades desnudas, entonces sería posible violar el teorema de Hawking y podría existir un *perpetuum mobile*. ¡Las singularidades desnudas podrían ser la solución a la crisis de la energía!

Si consideramos la otra suposición implícita en el teorema, que la masa o energía negativas son imposibles, parece ser que está bien fundamentada mientras consideremos materia o energía ordinarias. Pero en 1974 el propio Hawking descubrió que cuando consideramos materia o energía subatómicas, el asunto cambia radicalmente. Por aquel entonces, el interés fundamental de Hawking estaba relacionado con los agujeros negros microscópicos que algunos suponen que se formaron durante la gran explosión (véase el final del capítulo 5). Agujeros con masas de mil millones de toneladas (un kilómetro cúbico de agua) tendrían tamaños comparables al del núcleo de un átomo pequeño, de manera que no podemos ignorar los efectos subatómicos.

La teoría que trata de los procesos subatómicos se denomina mecánica cuántica y en mi libro *Otros mundos* la explico con detalle. La mecánica cuántica describe, entre otras cosas, procesos en los cuales se pueden crear y destruir partículas subatómicas incluyendo fotones de luz. Por ejemplo, la mecánica cuántica proporciona una descripción completa de la forma en que un átomo excitado puede desexcitarse y emitir un fotón, lo cual ocurre continuamente en una lámpara eléctrica.

Cuando se aplica la mecánica cuántica a los agujeros negros se obtiene un resultado extraordinario y totalmente inesperado. Incluso no habiendo átomos en el agujero (la materia se ha contraído totalmente en la singularidad) se crean partículas, más o menos a partir del espacio vacío. De la región que rodea el agujero salen electrones, protones, mesones, fotones, neutrinos (de hecho cualquier tipo posible de partícula y antipartícula subatómicas). Y aún más extraordinario que la aparición de estas partículas es el hecho de que sus energías corresponden exactamente a las que serían emitidas por un cuerpo que estuviera en equilibrio térmico en su entorno. Ello implica que hay una temperatura característica asociada al agujero, y en el caso de los miniagujeros esta temperatura no es despreciable, alrededor de cien mil millones de grados. Ciertamente los agujeros negros no son totalmente negros y de hecho los miniagujeros están tan calientes que es como si fueran blancos.

El descubrimiento de que los agujeros negros pequeños radian como hornos dio una dimensión totalmente nueva a la cuestión de las singularidades desnudas y al teorema del área de Hawking. Si el agujero radia energía en forma de partículas subatómicas debe pagar un precio perdiendo masa de alguna forma. ¿Pero cómo? Las partículas mismas no salen del agujero, ya que nada puede salir de

un agujero negro. Un examen más detallado revela que el mismo concepto de posición de una partícula subatómica pierde su sentido para dimensiones tan minúsculas.

Las investigaciones posteriores aclararon cómo pierden masa los agujeros negros. Las propiedades peculiares de la materia y la energía cuánticas permiten que aparezca masa-energía negativa en lugares muy determinados. La energía negativa en los alrededores del agujero negro es producida por la intensa gravedad, y aquélla atraviesa el horizonte de sucesos entrando en el agujero. En consecuencia, la masa de éste disminuye, no porque haya escapado materia, sino porque ha entrado masa negativa. Como consecuencia del flujo de masa negativa hacia el interior del agujero, se violan las condiciones necesarias para que se cumpla el teorema del área de Hawking y el área del agujero negro disminuye. En resumen, a medida que el agujero negro radia energía calorífica hacia su entorno, disminuye lentamente su tamaño.

Una de las particularidades del agujero negro cuántico es que la temperatura del agujero crece a medida que disminuye la masa. Esto significa que para un agujero negro grande, como el originado por el colapso de una estrella, esta temperatura es minúscula, alrededor de una diezmillonésima de grado por encima del cero absoluto. Estos agujeros negros son casi completamente negros, y su pequeña radiación cuántica sería prácticamente indetectable. Pero en los miniagujeros el panorama cambia. A una temperatura de cien mil millones de grados radian intensamente hacia su entorno y pierden energía a un ritmo tremendo. Además, a medida que pierden energía, y por tanto masa, su temperatura crece, al revés que los sistemas normales, que se enfrían cuando pierden calor. El proceso de radiación es, pues, inestable y se dispara, al calentarse más y más el agujero negro e ir perdiendo calor de forma cada vez más rápida. Siguiendo este proceso, el agujero negro va perdiendo calor de forma cada vez más rápida, se va evaporando gradualmente.

En contraste con el colapso casi instantáneo de la materia, que en primer término origina un agujero negro, la evaporación cuántica es extremadamente lenta. A pesar de la enorme temperatura del agujero, sus reservas totales de masa-energía son colosales. Nuestro agujero de mil millones de toneladas tiene energía suficiente como para satisfacer el consumo total de energía en todo el mundo durante cientos de millones de años, y está contenido en un tamaño menor que un núcleo atómico. Transcurren miles de millones de años antes de que la radiación cuántica tenga ningún efecto radial.

Pero cuando finalmente se acaban las reservas de energía el resultado es espectacular. La temperatura se dispara más allá de cualquier valor experimentado directamente por la ciencia, y el ritmo de evaporación escapa a todo control. Al agujero negro le sobreviene una tremenda crisis. El horizonte empieza a contraerse de forma apreciable en años, después en días y más tarde en segundos y en microsegundos. Al disminuir las últimas reservas de masa, la evaporación del agujero se convierte en explosión y se produce en un instante un gran estallido de energía. El propio agujero negro se ha contraído aparentemente hasta la nada y el horizonte de sucesos se ha ido aplastando hasta llegar a la singularidad. Toda la masa ha abandonado el agujero dejando... ¿qué? ¿Una singularidad desnuda? Si se considera de forma estricta el proceso de evaporación del agujero negro, parece que conduce inevitablemente a una singularidad desnuda sin masa. Qué aspecto tendría un objeto así es algo que nadie sabe, si bien ha habido mucha especulación al respecto (véase el próximo capítulo).

La evaporación de un agujero negro hasta formar una singularidad desnuda parece estar basada en fundamentos más firmes que los otros supuestos que producen singularidades desnudas y que hemos visto en este capítulo. Esto se debe en parte a que todos los agujeros negros experimentarán la evaporación, independientemente de que estén girando o tengan carga eléctrica; en realidad, uno de los efectos de la radiación es la reducción de ambas cosas. Por lo tanto, no encontramos la objeción de que el resultado se basa en la clase de idealizaciones matemáticas que hemos discutido más arriba, como en el caso de los lápices en equilibrio sobre sus extremos. Si se evapora un agujero negro ideal, también lo hace uno que no lo sea. Otro motivo para confiar en el resultado de Hawking es que la calidad de la radiación emitida por el agujero sea de un tipo muy especial, como asociada a un cuerpo en equilibrio térmico. Ya hemos mencionado que la segunda ley de la termodinámica guarda una analogía muy estrecha con el teorema del área de Hawking. Ahora vemos que los agujeros negros cuánticos se comportan talmente como cuerpos térmicos. Esto parece que es más que una coincidencia y sugiere una relación muy estrecha entre los agujeros negros y la termodinámica. Por este motivo nos vemos inclinados a considerar seriamente el proceso de la evaporación de un agujero negro.

El tema del equilibrio térmico es tan fundamental que vale la pena que lo consideremos con algún detalle. Durante el invierno de

1859-1860, el físico alemán Gustav Kirchhoff dirigió su atención hacia la siguiente propiedad del calor radiante. Si calentamos súbitamente una parte de un trozo de material, parte del calor tenderá a esparcirse por el material, mientras que otra parte será radiada por la superficie del mismo hacia su entorno. Dado que hay partes del cuerpo y del entorno que están calientes, y partes que no lo están tanto, el calor radiado se repartirá al azar entre las diferentes longitudes de onda. Las partes más calientes tenderán a radiar en longitudes de onda más cortas que las partes más frías.

Si en lugar de un trozo de material examinamos una cavidad completamente encerrada por paredes protegidas para que el calor no pueda escapar hacia afuera, entonces al cabo de un cierto tiempo las paredes de la cavidad alcanzarán una temperatura uniforme a medida que el calor se vaya distribuyendo progresivamente por todo el material. Parte del calor radiado hacia el interior de la cavidad será reabsorbido por la cara opuesta de la misma, de manera que no varía el equilibrio térmico que mantiene a todo el sistema a una temperatura constante.

El examen de una porción de superficie del interior de la cavidad muestra que aquélla irradia energía calorífica a la misma velocidad con la que absorbe el calor radiante que proviene de la cara opuesta. Esto ha de ser así, ya que de otra forma no se mantendría el equilibrio. Consideremos, por lo tanto, un haz de radiación calorífica de una determinada longitud de onda. Cuando llegue a la porción de superficie que estudiamos, parte de la radiación calorífica será absorbida y parte dispersada, o reflejada, otra vez hacia la cavidad. La proporción exacta del calor absorbido y reflejado dependerá de la naturaleza del material que forme las paredes. El metal, por ejemplo, es muy reflectante, mientras que la pintura negra absorbe muy bien el calor. Sea como fuere, cualquiera que sea la proporción que absorba el material, ha de ser exactamente igual a la cantidad de calor que la misma porción de superficie radia hacia la cavidad en el mismo intervalo, ya que de otra manera se rompería la estabilidad entre la emisión y la absorción que caracteriza al equilibrio térmico.

De este sencillo argumento se deduce que la cantidad de energía calorífica radiante que hay en la cavidad para una determinada longitud de onda permanece invariable. Pero dado que la cavidad está a una temperatura uniforme y la radiación calorífica va rebotando de forma prácticamente aleatoria, tiene que haber la misma cantidad de calor radiante por toda la cavidad, incluso en las regio-

nes en las que las paredes tienen propiedades reflectoras diferentes. (Por ejemplo, podríamos pintar de negro algunos trozos de una superficie metálica.) Según Kirchhoff, si la cantidad de calor es la misma en las cercanías de todos los materiales, entonces ha de ser independiente de cualquier material del cual estén hechas las paredes. Es decir, la energía del calor radiante para una determinada longitud de onda solamente depende de la temperatura del sistema y no de la clase de cavidad considerada.

El razonamiento de Kirchhoff está estrictamente ligado al supuesto del equilibrio térmico. Nos muestra que, por muy complicada que sea, para un trozo de material emisor, la distribución de la energía calorífica entre las diferentes longitudes de onda, cuando esté en equilibrio con su entorno, radiará siempre el mismo espectro calorífico para una temperatura dada. Si algún material de la cavidad absorbe totalmente la radiación calorífica que incide sobre él, deberá, para mantener el equilibrio, radiar exactamente el mismo espectro característico. Por este motivo, la radiación especial emitida por un cuerpo en equilibrio térmico se llama radiación del "cuerpo negro". Así pues, los agujeros negros de Hawking radian exactamente igual que los cuerpos negros de Kirchhoff. Es, indudablemente, una conexión misteriosa.

En el caso de que Hawking esté en lo cierto, ¿se puede esperar que en la actualidad estén explotando miniagujeros negros en el espacio dando origen a singularidades desnudas? Los cálculos muestran que la energía liberada en la última décima de segundo de su desaparición equivale a una bomba de un millón de megatones, lo cual puede resultar impresionante, pero para los estándares astronómicos es una explosión insignificante. Gran parte de la energía será liberada en forma de rayos gamma de alta energía. Se han colocado detectores (telescopios) de rayos gamma a bordo de satélites y algunos de ellos han detectado explosiones de rayos gamma, si bien ninguna con las características esperadas en la explosión de un agujero negro.

Un análisis más detallado revela los formidables problemas que se presentan con los intentos de detectar agujeros negros utilizando telescopios de rayos gamma. No puede haber más que unos pocos miniagujeros por cada mil billones de billones (10^{27}) de kilómetros cúbicos, ya que de otra forma contribuirían a la masa del Universo más que las galaxias; en este caso deberíamos observar sus efectos gravitatorios. Y hay todavía una limitación más estricta, debida al hecho de que la acumulacion de rayos gamma originados por todas las explosiones de agujeros negros en todo el Universo no ha sido registrada por los instrumentos. De ello se deduce que no puede haber más que unas pocas docenas de estos objetos en cada año de luz cúbico. Por lo tanto, incluso tomando una estimación optimista, la próxima explosión que ocurriría durante un mes de observación se produciría a unos diez años luz de distancia, lo cual es excesivamente lejos como para esperar que podamos detectar una modesta explosión de proporciones nucleares.

A pesar de estas estimaciones pesimistas, existe la posibilidad, apuntada por Martin Rees, de la Universidad de Cambridge, de que efectos secundarios de estas explosiones podrían ser detectables a una distancia muy grande. El agujero, en sus instantes finales, alcanza una temperatura tan alta que no sólo se producen rayos gamma. También se emiten toda clase de fragmentos subatómicos: electrones, positrones, neutrones, mesones, etc... Muchas de estas partículas microscópicas tienen carga eléctrica, con lo cual aparece la posibilidad de que se produzcan poderosas perturbaciones electromagnéticas a partir de la emisión explosiva de estos restos. En particular, un agujero que explote en nuestras proximidades estará inmerso en el débil campo magnético de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Cuando estalla la lluvia de partículas eléctricas en el seno del campo magnético ambiental, la perturbación producida en este campo se propaga en forma de onda electromagnética, fundamentalmente como una onda de radio en la banda de frecuencia entre 100 y 1.000 Mhz. Dado que los radiotelescopios son mucho más sensibles que los telescopios de rayos gamma, y además tienen la ventaja de poder estar en la superficie de la Tierra, mediante una búsqueda sencilla utilizando instrumentación ya existente deberíamos ser capaces de detectar explosiones de agujeros negros en cualquier lugar de la galaxia. Si la idea de Rees es correcta, el hecho de que los radioastrónomos no hayan descubierto agujeros negros en explosión implica que es muy probable que no haya más de una explosión de miniagujeros por cada millón de años luz cúbicos y por año. Con un esfuerzo bien dirigido, deberíamos ser capaces de detectar incluso densidades de hasta un millón de veces menores que ésta.

Si bien es cierto que la búsqueda de los miniagujeros primordiales es extremadamente dificultosa, la compensación es importante. No solamente se confirmaría una de las predicciones científicas más espectaculares del siglo –en un campo en el que hay poquísimas restricciones experimentales para la imaginación científica–,

sino que acrecentaríamos enormemente nuestro conocimiento sobre el Cosmos primitivo. Los miniagujeros en explosión constituyen una reliquia del período cósmico más antiguo imaginable que podamos llegar a examinar en la práctica (véase capítulo 8).

Los agujeros en explosión proporcionarían, además de una poderosa base observacional en el área de la física gravitatoria y la cosmología, una oportunidad inigualable para que los físicos estudiaran directamente el comportamiento de la materia extremadamente energética, a temperaturas que difícilmente se conseguirán por otros medios. Incluso en los aceleradores de partículas más potentes del mundo, las energías liberadas corresponden a una temperatura de sólo unos mil billones (10^{15}) de grados. Durante los últimos años de su vida, un agujero negro en evaporación alcanza una temperatura mucho más elevada que la mencionada y crecerá rápidamente. La clase de partículas subatómicas que aparecen a estas temperaturas tan extraordinarias han estado ausentes del Universo desde su origen. Su estudio podría ser de inestimable valor para la comprensión de las fuerzas fundamentales de la naturaleza.

El agujero negro en evaporación y la ausencia de una prueba definitiva sobre la existencia de la censura cósmica sugieren que la singularidad desnuda es una posibilidad muy real. Si ello es así –y muchos físicos son reacios a aceptarlo–, la naturaleza estaría amenazada por la anarquía. Cuando aparece una singularidad en el Universo, la organización racional del Cosmos está amenazada de destrucción.

7. Frente a lo desconocido

La tremenda crisis que le sobrevendría al Universo físico, en el caso de que apareciera una singularidad desnuda, se podrá apreciar mejor si se entiende en primer término la naturaleza de causa y efecto y el papel del determinismo y la predicción en la ciencia.

Hace mucho tiempo, en las sociedades primitivas, la gente no comprendía prácticamente nada acerca de los fenómenos naturales que se producían a su alrededor. Había acontecimientos regulares y sistemáticos, como las fases de la Luna, los eclipses y las estaciones. También había fenómenos repentinos y violentos, como los terremotos y las inundaciones. Todos ellos se atribuían a los antojos y caprichos de los dioses, y se suponía que estaban originados por la intervención sobrenatural.

Con el paso de los siglos, y el establecimiento del método científico basado en la experimentación y la observación cuidadosa, junto con el análisis matemático, se fue haciendo evidente que la explicación de muchos de estos fenómenos materiales residía no en causas divinas, sino en otros fenómenos físicos. Los eclipses, por ejemplo, se explicaban por la alineación geométrica de la Tierra, el Sol y la Luna causada por su movimiento regular de rotación, uno alrededor de otro, en órbitas perfectamente definidas matemáticamente y que podían ser calculadas a partir de las leyes de Newton de la gravedad y del movimiento. Se descubrió que las erupciones volcánicas y los repentinos temblores de tierra eran ocasionados por la acumulación de presión y de tensiones en la corteza terrestre.

Hoy en día, comprendemos la mayor parte del mundo que nos rodea de esta manera. Las cosas ocurren porque otras suceden y éstas a su vez ocurren debido a sucesos anteriores y así sucesivamente, en una cadena de causas y efectos que en último extremo

abarca a todo el Universo. Así, la acumulación de tensiones en la corteza terrestre se debe a las fuerzas que existen en el interior de la Tierra y que hacen derivar lentamente las placas que forman la superficie terrestre. Estas fuerzas de deriva son originadas, en parte al menos, por el calor que fluye del núcleo de la Tierra, y este calor se puede atribuir a la energía liberada por la radiactividad que se origina en los elementos situados en el núcleo. A su vez, los procesos radiactivos se conocen en detalle y tienen su origen en las inestabilidades que se producen en la lucha entre las fuerzas antagonistas que mantiene unido al núcleo atómico. Y así sucesivamente.

Evidentemente hay todavía lagunas en nuestro conocimiento y comprensión del funcionamiento del mundo físico. Nuestra comprensión de los sistemas biológicos, por ejemplo, es todavía muy pobre. Pero son muy pocos los científicos que creen que un suceso pueda ocurrir sin una causa física previa, la cual, con el esfuerzo de investigación necesario, puede llegar a ser descrita en detalle mediante alguna teoría matemática. En nuestros días incluso los teólogos se inclinan a creer que Dios nunca interfiere en el funcionamiento del Universo, con la posible excepción de la creación.

La creencia de que todo suceso que ocurre en el Universo tiene su origen en alguna causa precedente evoca la imagen del mundo físico como un complejo entramado de influencias, íntimamente entrelazadas y ejerciendo continuamente acciones y reacciones entre sus partes componentes, con una pluralidad de fuerzas y campos. Si bien hoy en día sólo conocemos una parte de este conjunto, es fácil suponer que, al menos en principio, todo lo que ocurre en el Universo está completamente determinado por todo lo demás.

En cierta ocasión Pierre Laplace dijo que, si se tuviera un completo conocimiento del estado del Universo en un instante dado –si se supiera la posición de cada átomo y cómo se está moviendo– entonces se podría, en principio, predecir completamente y en detalle el futuro del Universo utilizando las matemáticas. La base de esta extraordinaria afirmación radica en la creencia de que todo lo que ocurrirá mañana, por ejemplo, tiene su causa (es decir, viene determinado en detalle) en todo lo que está ocurriendo hoy. El razonamiento es evidente: si no hay influencias externas, como la intervención divina, que invadan el Universo, entonces la causa de todos y cada uno de los sucesos de mañana debe estar entre alguno de los sucesos de hoy. Al menos ésta era la opinión de Laplace. Veremos más adelante que las cosas no son tan sencillas como suponían los filósofos y los científicos de siglos anteriores.

Un hecho fundamental implícito en todas estas ideas deterministas es que nuestro imaginario profeta ha de tener un completo conocimiento de todo el Universo. Esto es necesario ya que si omitiéramos alguna región del Universo, podría suceder que algunas influencias originadas en esa región invadieran la parte del Universo que nos interesa y en consecuencia estropearan las predicciones. Por ejemplo, el movimiento de los planetas alrededor del Sol puede determinarse con todo detalle simplemente conociendo el propio sistema solar, pero el comportamiento futuro que predijéramos estaría completamente equivocado si un planeta errante, arrojado desde algún lugar distante de la galaxia, atravesara inesperadamente el sistema solar.

Con el descubrimiento de la teoría de la relatividad en 1905, se hubieron de modificar un poco las ideas anteriores para tener en cuenta el hecho de que ninguna influencia física puede propagarse más rápidamente que la luz. Esto significa que, en realidad, podemos ignorar las partes lejanas del Universo cuando hacemos predicciones sobre el comportamiento futuro de una región determinada, suponiendo que las predicciones se limitan a instantes no demasiado alejados en el futuro. Así, en el caso del sistema solar, podemos hacer predicciones con un año de antelación siempre que conozcamos los sucesos que están ocurriendo en una zona de un año luz de radio en la periferia del sistema solar. El planeta errante que amenaza con entrar en escena, debe estar como máximo a un año luz de distancia si quiere llegar, viajando como máximo a la velocidad de la luz, dentro del próximo año. En tal caso deberíamos incluir este objeto dentro de nuestra zona de año luz de radio que incluye a todas las causas que pueden influir sobre los sucesos correspondientes. Nada de lo que ocurre fuera de esta zona de un año luz puede afectar al sistema solar durante el próximo año. Evidentemente, cuanto más lejos en el tiempo queramos llevar nuestras predicciones, mayor será el volumen de Universo que deberemos considerar para estar seguros de tener en cuenta todas las influencias causales.

El papel central que desempeñan los rayos de luz en el tema de la causalidad complica las cosas cuando el volumen de espacio que consideramos implica dimensiones extragalácticas, ya que debemos tener en cuenta la expansión del Universo y la curvatura del espacio-tiempo. Todo esto puede tener un efecto muy importante sobre la naturaleza de las predicciones y sobre el comportamiento del Cosmos a partir de unas determinadas leyes. Para ilustrarlo con un

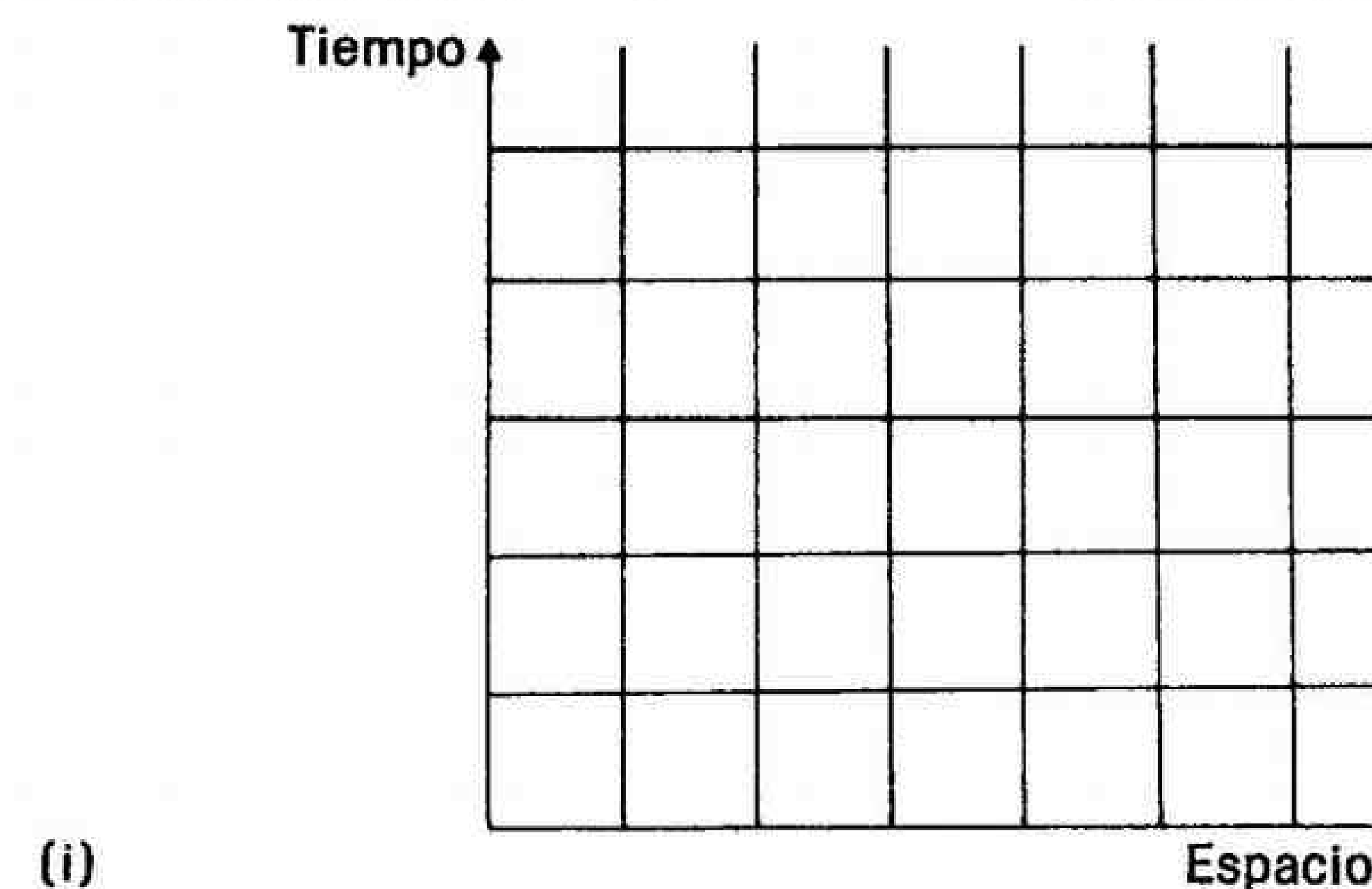
ejemplo estudiaremos en detalle las propiedades de un modelo del Universo propuesto originalmente en 1917 por el astrónomo holandés Willem de Sitter. Se basa en la teoría general de la relatividad de Einstein, en su descripción de la gravedad como curvatura del espacio-tiempo.

El modelo de Universo de De Sitter se puede entender mejor con la ayuda de un dibujo. En el capítulo 1 introdujimos la idea de un mapa del espacio-tiempo en el cual el tiempo se dibuja verticalmente y el espacio según la horizontal. Para representar las tres dimensiones del espacio más la del tiempo en una hoja de papel hemos de suprimir como mínimo una de las dimensiones espaciales, y si además queremos describir la curvatura del espacio-tiempo, sólo podremos utilizar una dimensión del espacio. En este caso representaremos el espacio-tiempo como una hoja que puede curvarse por efecto de la gravedad. La figura 40 muestra el tipo de Universo que resulta cuando la gravedad arruga el espacio-tiempo; representamos aquí las líneas solamente a efectos de visualización.

Si la hoja que representa el espacio-tiempo se puede curvar, existe evidentemente la posibilidad de que se junte consigo misma en una forma cerrada, del mismo modo que el cilindro de la figura 41. Así, no podemos estar seguros de que la topología del Universo sea la de una hoja que se extiende indefinidamente. Podría ser que se asemejara más a la de un cilindro. ¿Qué significado físico tiene todo esto?

Si recordamos que el tiempo corre según la vertical y el espacio horizontalmente, el espacio-tiempo cilíndrico de la figura 41 representa un mundo en el cual el espacio no tiene una extensión indefinida, sino que se curva totalmente y se junta consigo mismo. Si queremos tomar una "instantánea" de todo el Universo en un momento dado, obtendremos una rodaja horizontal del cilindro, es decir, un círculo. El círculo es una representación unidimensional de un espacio tridimensional cerrado y finito. En este espacio, un viajero que parta en una determinada dirección y dé la vuelta al Universo volverá al punto de partida por la dirección contraria a la que partió, como si fuera un Magallanes cósmico. Así como la circunferencia del círculo es finita, también lo es el volumen de este Universo cilíndrico; podríamos, en principio, viajar a cualquier lugar del Universo. Es preciso observar, no obstante, que si bien este Universo tiene un volumen finito, no tiene límite ni barreras, ni bordes, ni centro. Cualquier punto del círculo es equivalente a cualquier otro.

La idea de que el espacio no se extiende de forma infinita, pero



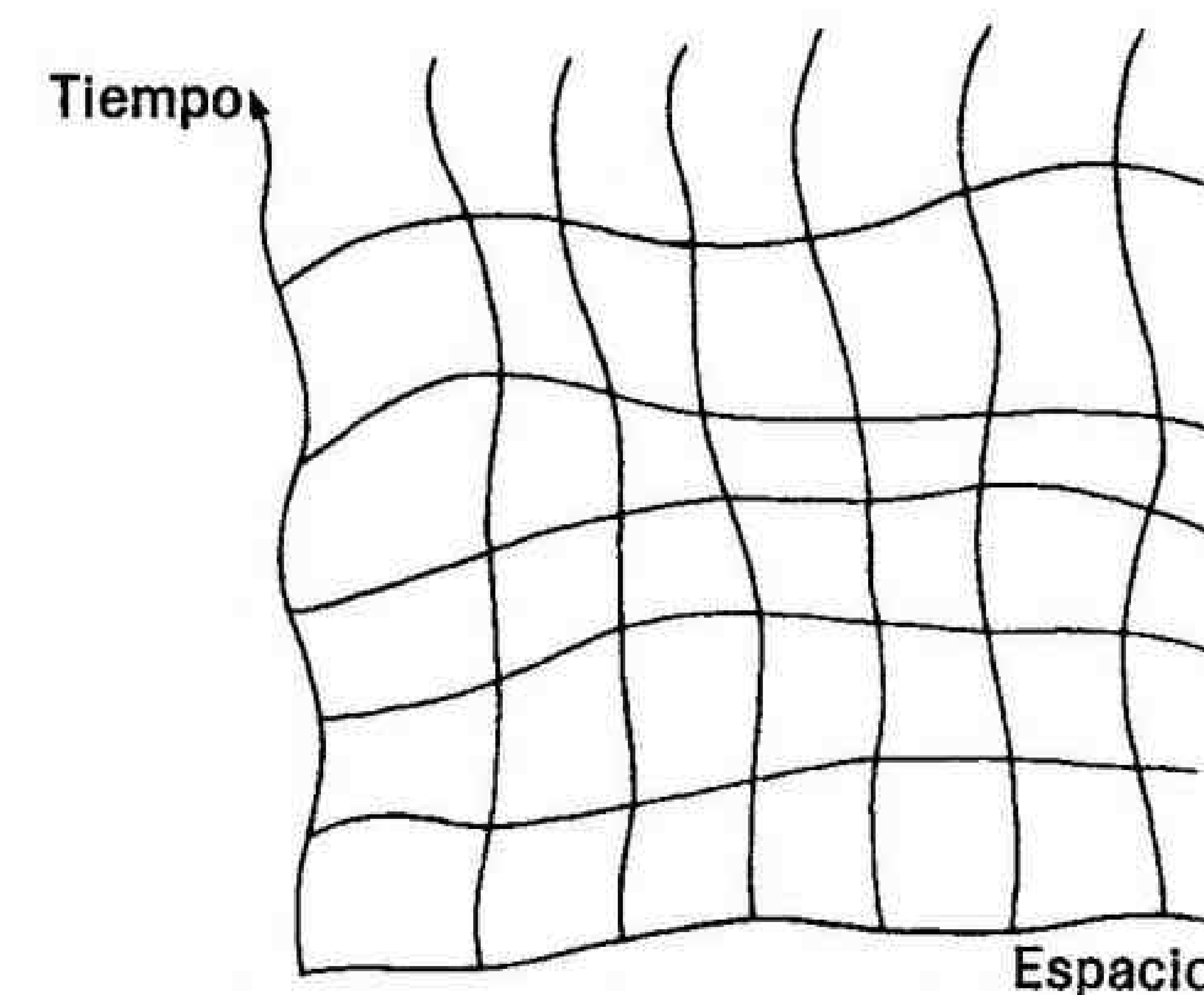


Fig. 40. *(i)* Si representamos el espacio-tiempo como una hoja podemos imaginar líneas paralelas de "longitud" y "latitud" (llamadas coordenadas) para señalizar la situación de los sucesos.

(ii) Cuando está presente la gravedad son imposibles las coordenadas paralelas en todas partes, ya que se distorsiona el espacio-tiempo.

que al mismo tiempo no existe un borde del Universo parece desconcertante y es difícilmente visualizable pensando en modelos como los del diagrama que se muestra en la figura 41. Sin embargo, tiene sentido físico y geométrico y puede verificarse mediante la observación astronómica. Desgraciadamente, habrán de pasar todavía unos cuantos años antes de que los astrónomos tengan telescopios suficientemente potentes como para establecer de forma definitiva

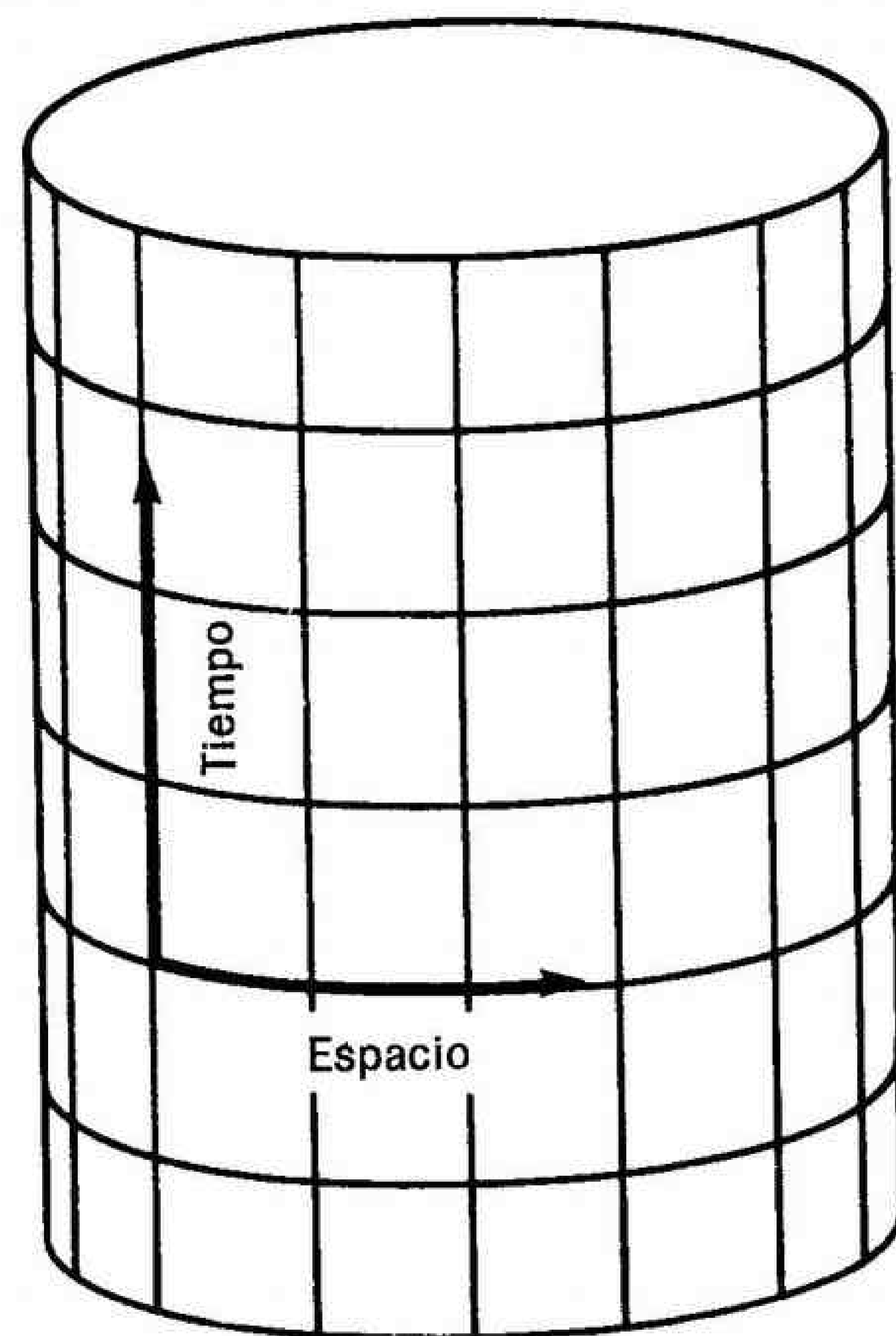


Fig. 41. *Universo cilíndrico.* Esta figura representa un Universo en el cual el espacio tiene un volumen finito. Debemos imaginar que el cilindro se extiende en vertical hasta el infinito.

si el espacio se extiende infinitamente o bien si es cerrado como un cilindro.

Una cuestión que aparece siempre en las discusiones sobre el espacio cerrado es el significado que se le da, por ejemplo, a las regiones interior y exterior del cilindro. Es importante recordar que representamos el espacio-tiempo mediante una hoja ella misma bidimensional y que la región interior del cilindro no es una parte del Universo físico. El único motivo para que lo consideremos así es para ayudar a visualizar la topología del cilindro, pero no es lógicamente necesario incluirla en nuestro estudio.

Para entenderlo imaginemos las experiencias de un observador que esté permanentemente ligado a la hoja, de la misma forma que nosotros lo estamos al espacio-tiempo. El observador viaja una y

otra vez alrededor del Universo a velocidad constante, volviendo cada vez al punto de partida. La trayectoria del observador es una hélice como la de la figura 42. Los intervalos de tiempo que transcurren entre las sucesivas visitas a un lugar determinado, como por ejemplo el "hogar", son siempre los mismos. Nuestro observador no puede ver hacia el interior o el exterior del cilindro y tiene incluso algunas dificultades en entender la propia idea de "interior" y "exterior". Sabe que su mundo tiene un volumen finito, pero no tiene ninguna necesidad de elaborar un modelo que requiera de una curvatura en otra dimensión, tal como hemos hecho nosotros. En su lugar, podría seguir pensando que su mundo es una hoja plana infinita, consistente en una secuencia infinita de bandas verticales (véase figura 43) todas ellas idénticas.

Si se imagina que hacemos rodar el cilindro sobre una hoja plana, de forma que todos sus puntos (por ejemplo, el "hogar") quedan marcados sobre la hoja, entonces obtendremos un mapa del cilindro "desenrollado" repetido muchas veces a medida que va rodando una y otra vez. La trayectoria del observador consistiría entonces

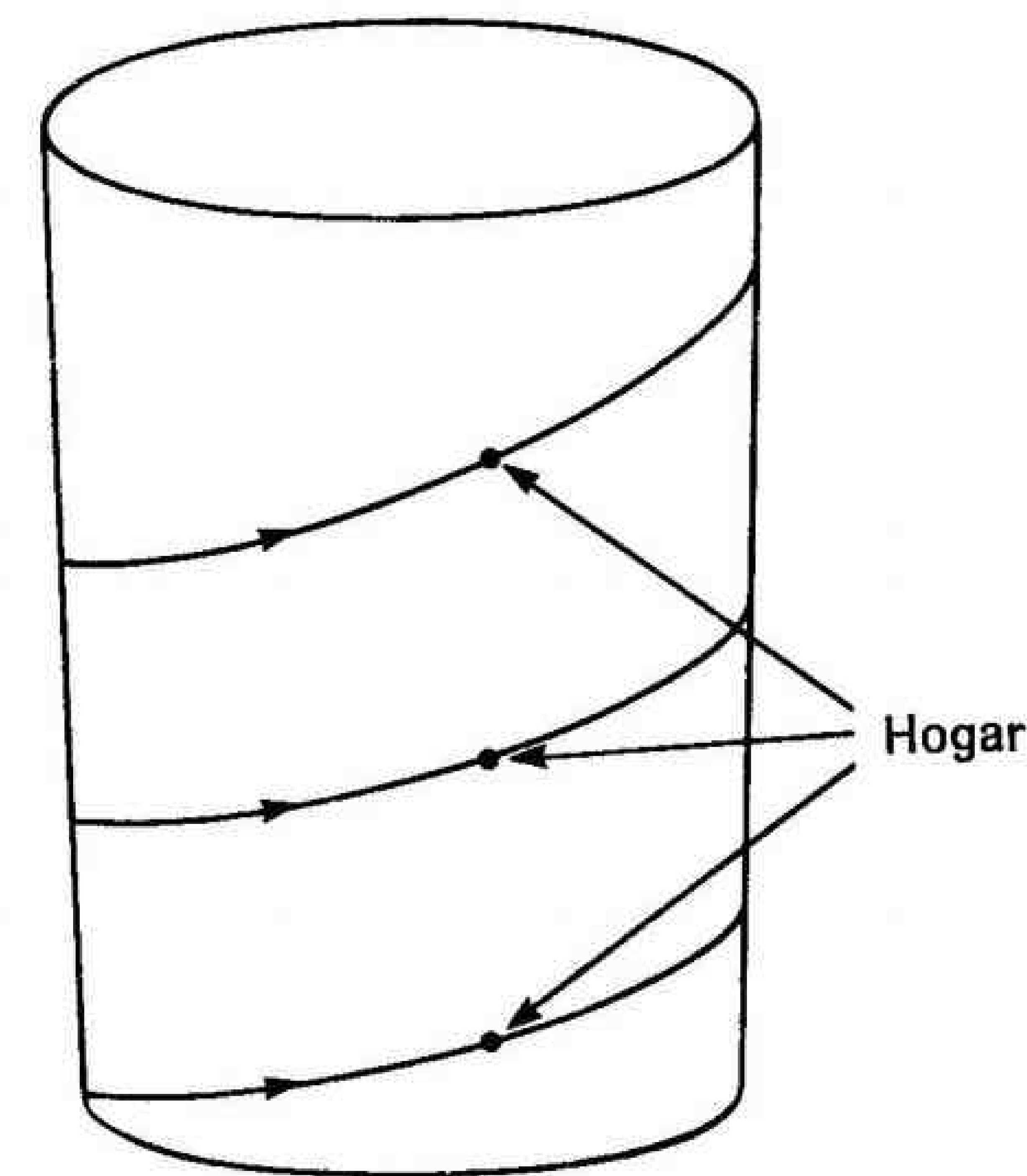


Fig. 42. Un astronauta circunnavega repetidamente el espacio finito de su Universo cilíndrico.

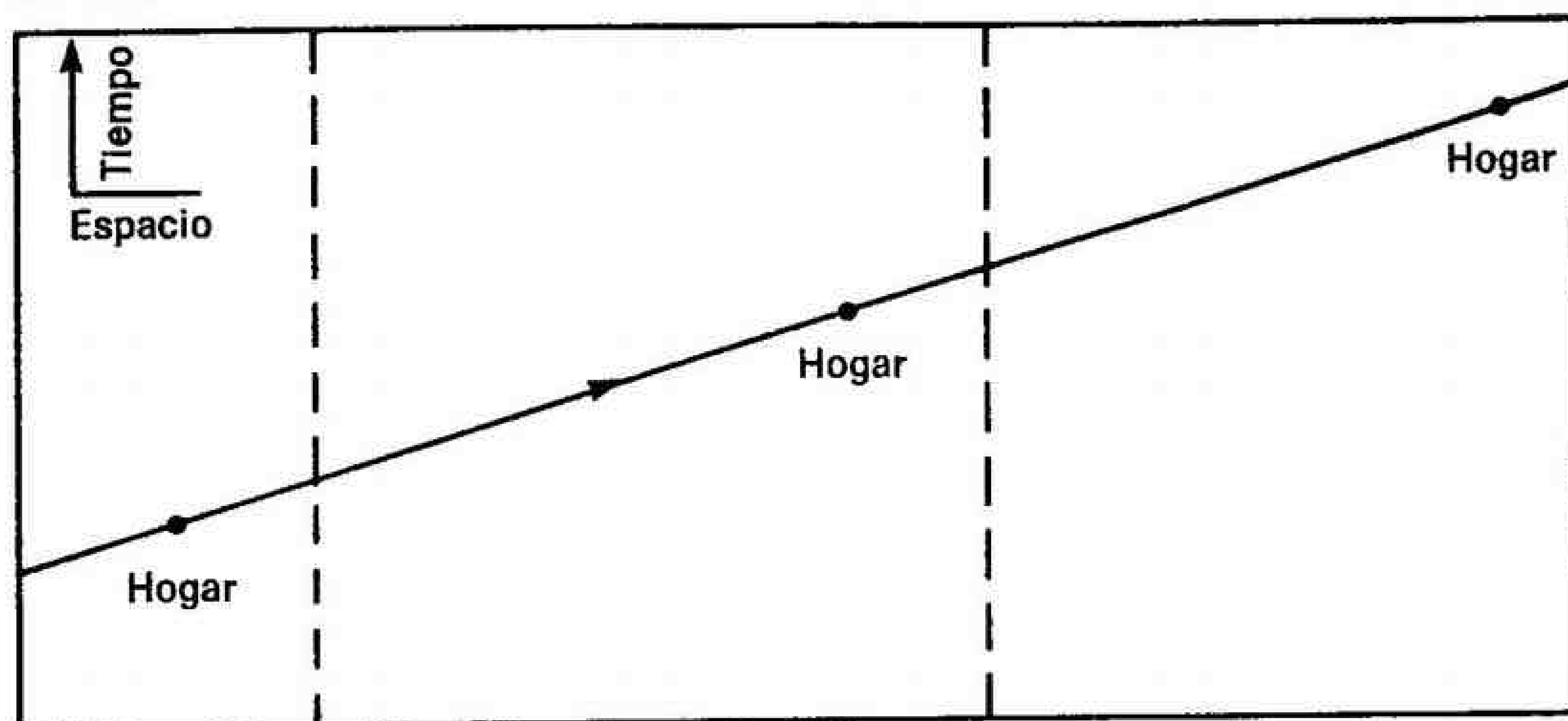


Fig. 43. Podríamos reinterpretar las experiencias del astronauta de la figura 42 sin necesidad de acudir a un cilindro. Esta hoja infinita está dividida en bandas verticales idénticas. A medida que el astronauta pasa por cada banda experimenta las mismas situaciones, exactamente igual que si circunnavega el cilindro. (Se ha aumentado un poco la escala horizontal.)

en una línea que iría atravesando las bandas idénticas, encontrando una y otra vez copias exactas del "hogar". Este Universo bidimensional en bandas es físicamente el mismo que el cilindro, en lo que respecta al observador, y ya no aparecen las regiones "interior" y "exterior" del cilindro.

No siempre es posible llevar a cabo este proceso de "desenrollado" matemático para más dimensiones o para otra forma geométrica cualquiera (por ejemplo, la esfera), pero las consideraciones físicas son las mismas. Si bien el espacio que rodea a la hoja del espacio-tiempo ayuda a la visualización, es puramente ficticio para un observador ligado a la hoja, y es totalmente innecesario. Las propiedades geométricas y topológicas del espacio tienen perfectamente sentido en términos de las observaciones limitadas estrictamente a la hoja del espacio-tiempo. Lo mismo es cierto para el espacio tridimensional real.

Einstein inventó en 1917 un Universo cilíndrico cuatridimensional. Sin embargo, no proporciona una imagen muy buena del Universo real, incluso suponiendo que el espacio sea cerrado y finito. El motivo está en el descubrimiento, hecho a finales de los años 20 por el astrónomo norteamericano Edwin Hubble, de que el Universo no es estático sino que está en proceso de expansión. Hubble descubrió

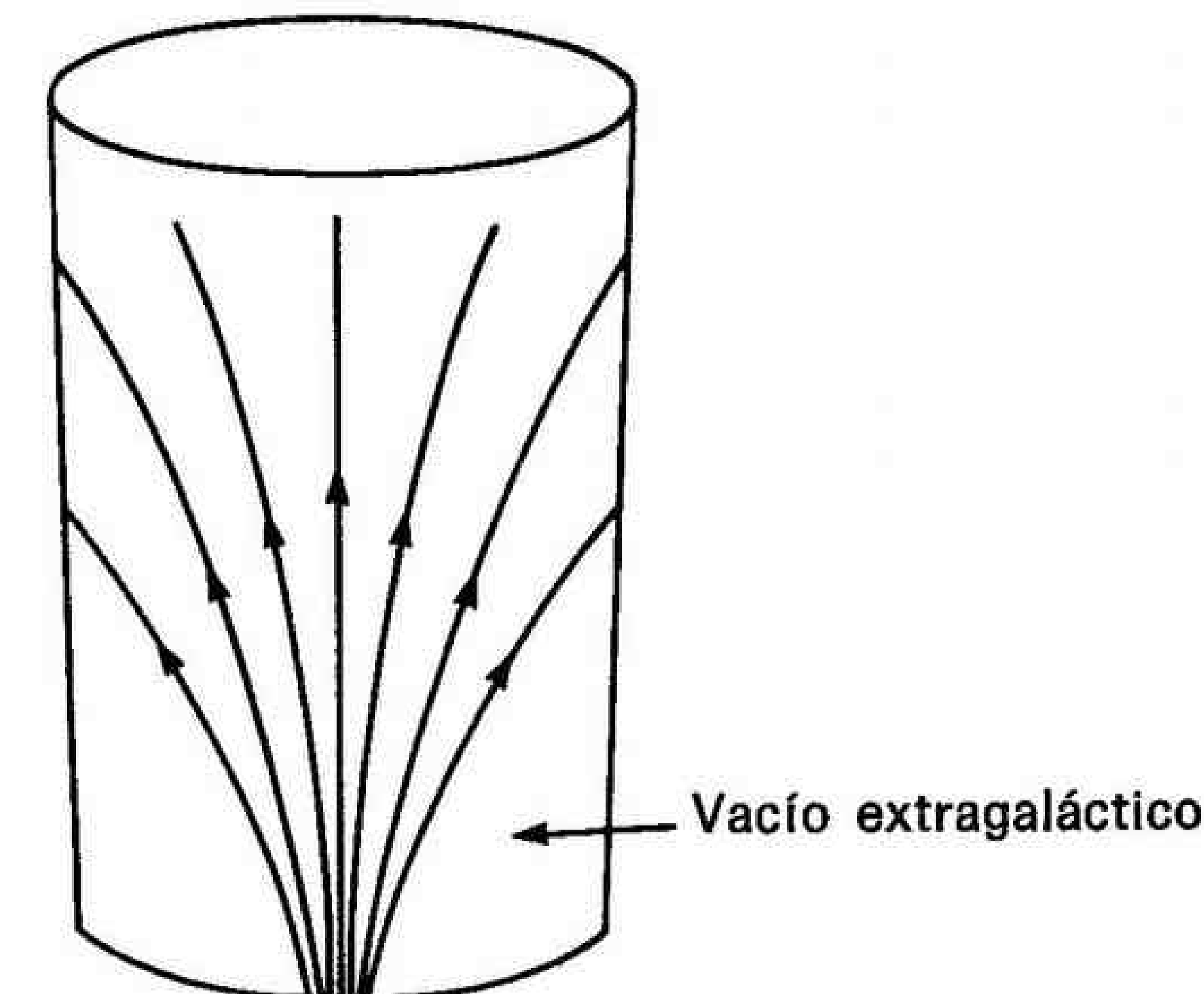


Fig. 44. *Modelo equivocado de la Gran explosión (Big bang).* Un inmenso trozo inicial explota y los fragmentos se expansionan llenando el espacio disponible en el Universo cilíndrico.

que todas las galaxias se alejan las unas de las otras de manera sistemática.

La expansión del Universo es hoy en día una piedra angular de la cosmología, pero su verdadera naturaleza es a menudo mal entendida. Mucha gente (incluyendo algunos científicos) piensan que el alejamiento de las galaxias se debe a la explosión de un trozo de materia en el interior de un vacío que ya existía, y que las galaxias son los fragmentos que se precipitan a través del espacio. Esto es totalmente erróneo. No hay ninguna evidencia astronómica de que el Universo tenga un centro ni un borde, tal como implicaría la idea de un trozo de materia en explosión. Además, si el espacio es finito, parece que las galaxias deberían distribuirse por todo el espacio de manera uniforme y no estar concentradas en una burbuja.

Esta popular, y errónea, situación, está representada en la figura 44. Las líneas de Universo de las galaxias se extienden hacia el futuro, a medida que el conjunto total de galaxias se dispersa llenando el volumen de espacio disponible. Por el contrario, la figura 45 muestra la representación correcta. Aquí las galaxias no se dispersan en absoluto por el espacio. Lo que ocurre, en cambio, es que las galaxias llenan uniformemente el espacio en cada instante (es decir, se distribuyen por igual en todas partes sin ningún tipo de concen-

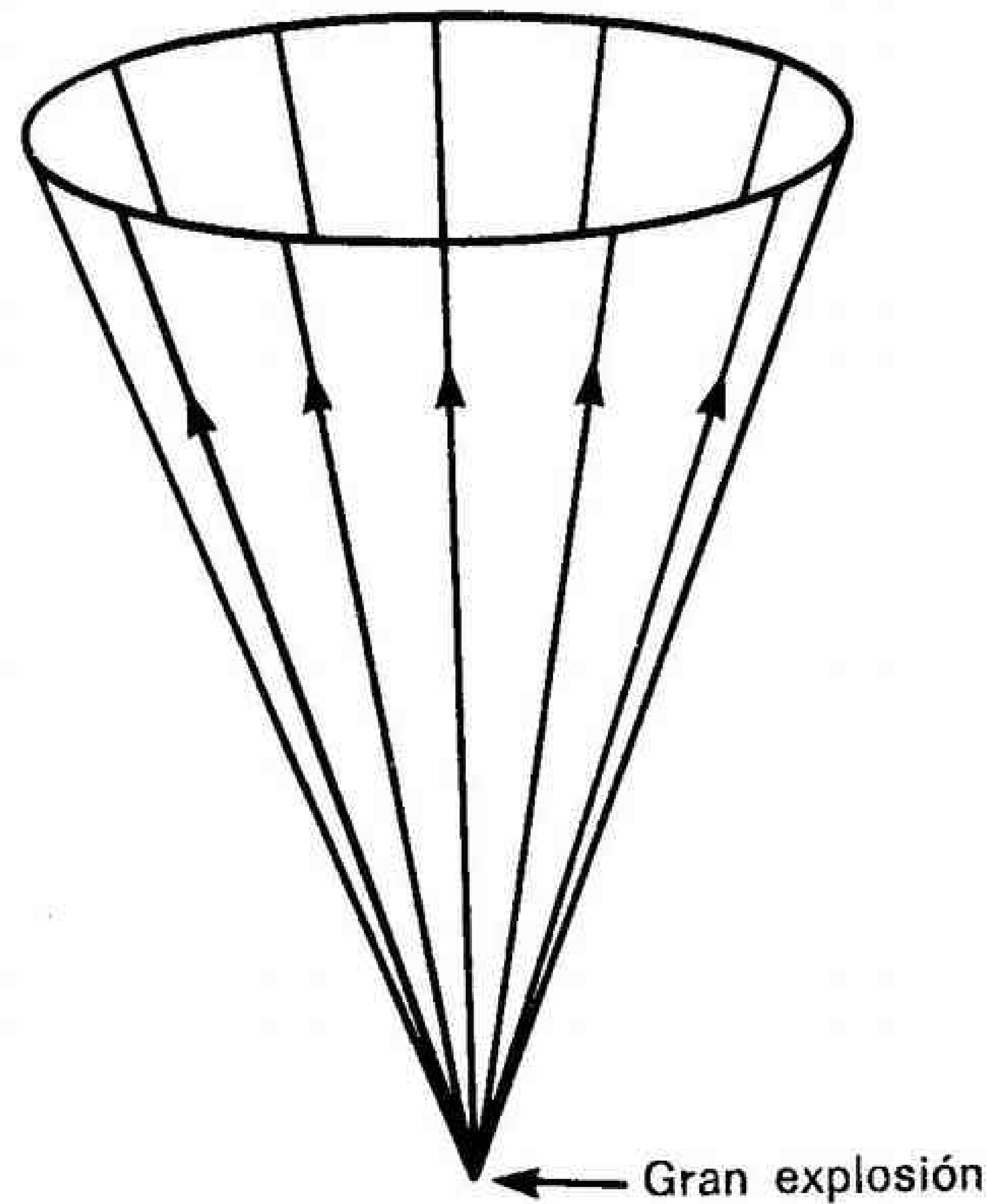


Fig. 45. *Modelo correcto de la Gran explosión.* Las galaxias no se mueven, sino que es el espacio el que se expansiona a partir de la nada. Los vacíos intergalácticos se expansionan en el transcurso del tiempo, produciendo el efecto de que las galaxias se alejan.

tración central) y el *propio cilindro* es el que se expansiona. La expansión del Universo no es, pues, un movimiento de las galaxias *a través* del espacio, alejándose de un centro, sino que es una expansión estacionaria del espacio.

En el Universo real podemos pensar que la expansión cósmica es debida a un crecimiento del espacio en todas partes. Es como si alrededor de cada galaxia aparecieran cada día cien mil millones de billones de billones de billones (10^{45}) de kilómetros cúbicos de nuevo espacio, a partir de la nada. Por lo tanto, la distancia entre las galaxias aumenta, no porque se alejen unas de las otras en el sentido tradicional, sino porque el espacio entre ellas crece sin cesar.

El modelo de Universo de De Sitter incorpora esta característica de la expansión cósmica, aunque fue propuesto varios años antes del gran descubrimiento de Hubble. La forma de espacio-tiempo de De Sitter se muestra en la figura 46 y se observa inmediatamente

que si bien la parte superior representa un espacio en expansión, la parte inferior es simétrica a ésta y por tanto representa un espacio en contracción. Así, en el Cosmos de De Sitter el Universo se contrae a partir de un volumen infinito, rebota en un tamaño mínimo y se expansiona de nuevo. Otra característica importante es la forma en que la "hoja" del espacio-tiempo se curva hacia afuera por arriba y por abajo. Esto significa que la expansión se hace más y más rápida a medida que transcurre el tiempo. Veremos más adelante las implicaciones que ello tiene para la propagación de la luz y la naturaleza de la causalidad en el modelo de Universo de De Sitter.

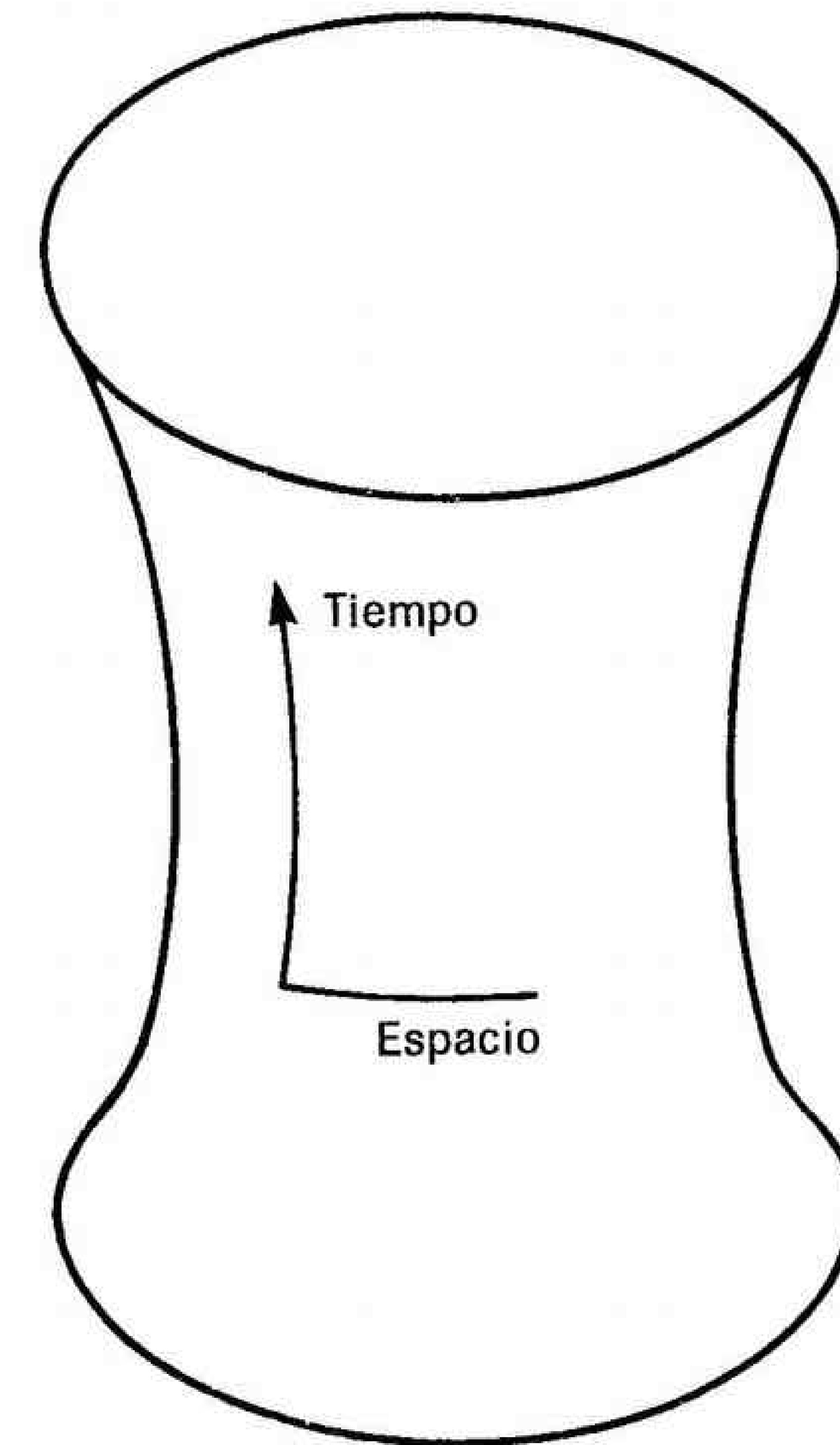


Fig. 46. *Modelo de Universo de De Sitter.* Esta hoja de forma hiperboloide representa un espacio finito que se contrae hasta un volumen mínimo y después se expansiona a un ritmo acelerado. En esta figura y las que siguen debemos imaginar que el hiperboloide se extiende en vertical hasta el infinito.

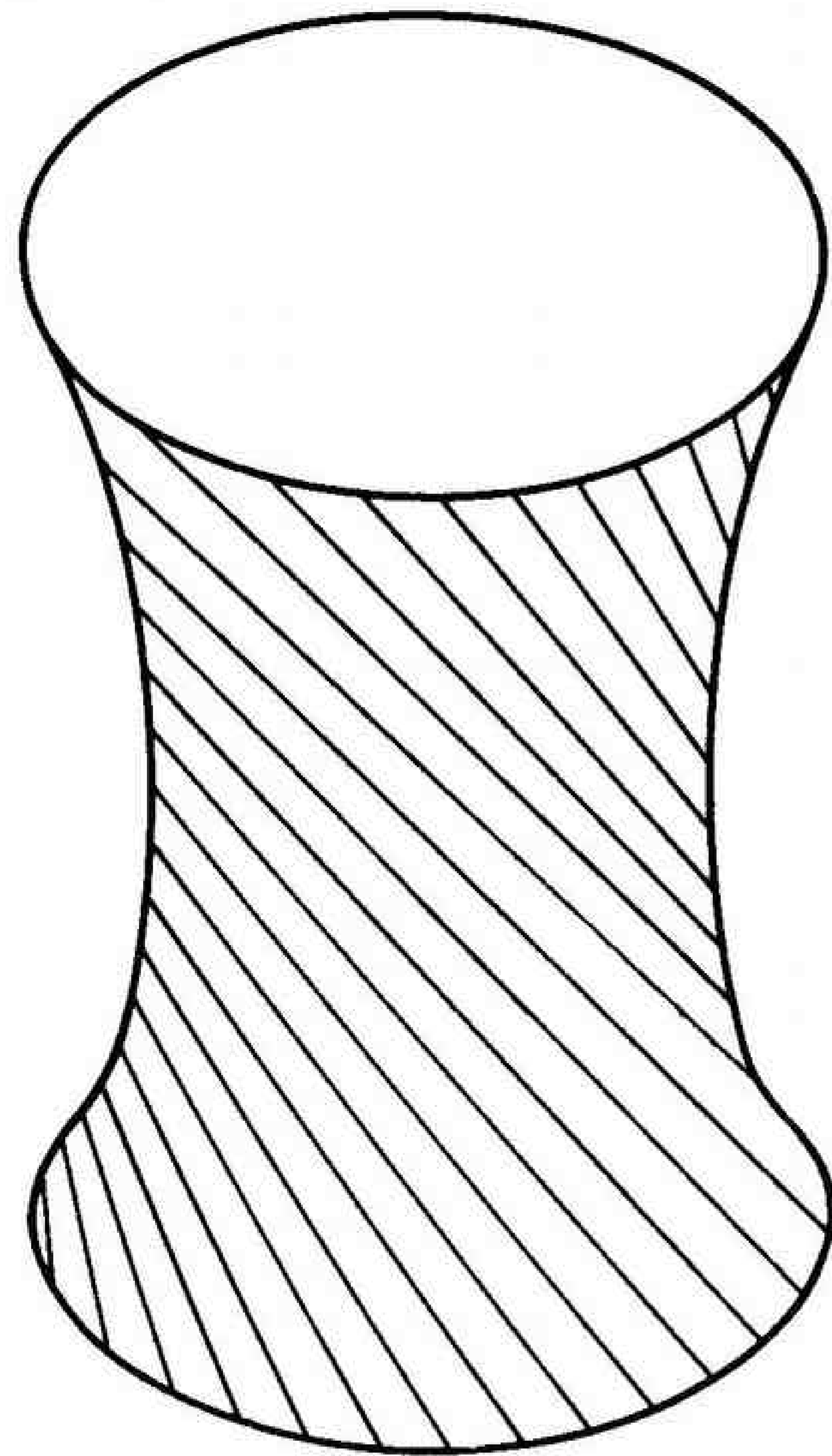


Fig. 47. *Asiento de mimbre.* La superficie hiperboloide de la figura 46 puede ser construida con un conjunto de tiras rectas inclinadas en la forma que se indica. En el espacio de De Sitter estas líneas podrían ser las trayectorias de los rayos de luz. Rayos parecidos (que no se muestran) irían desde la izquierda de la base hacia la derecha del borde superior.

El nombre teórico de la forma de la superficie de la figura 46 es el de hiperboloide. Si se hacen cortes horizontales las secciones son círculos, que representan el espacio cerrado y finito. Si los cortes se hacen verticalmente, las líneas son hipérbolas, cada una de las cuales representa toda la historia de una galaxia (es decir, su línea de Universo). A pesar de estos detalles tan técnicos, el hiperboloide es una forma bastante familiar, ya que es posible construirla con tiras rectas. Puede parecer sorprendente que una superficie que se curva en dos direcciones perpendiculares se pueda construir de esta forma, pero esta propiedad es la que la hace popular entre los cons-

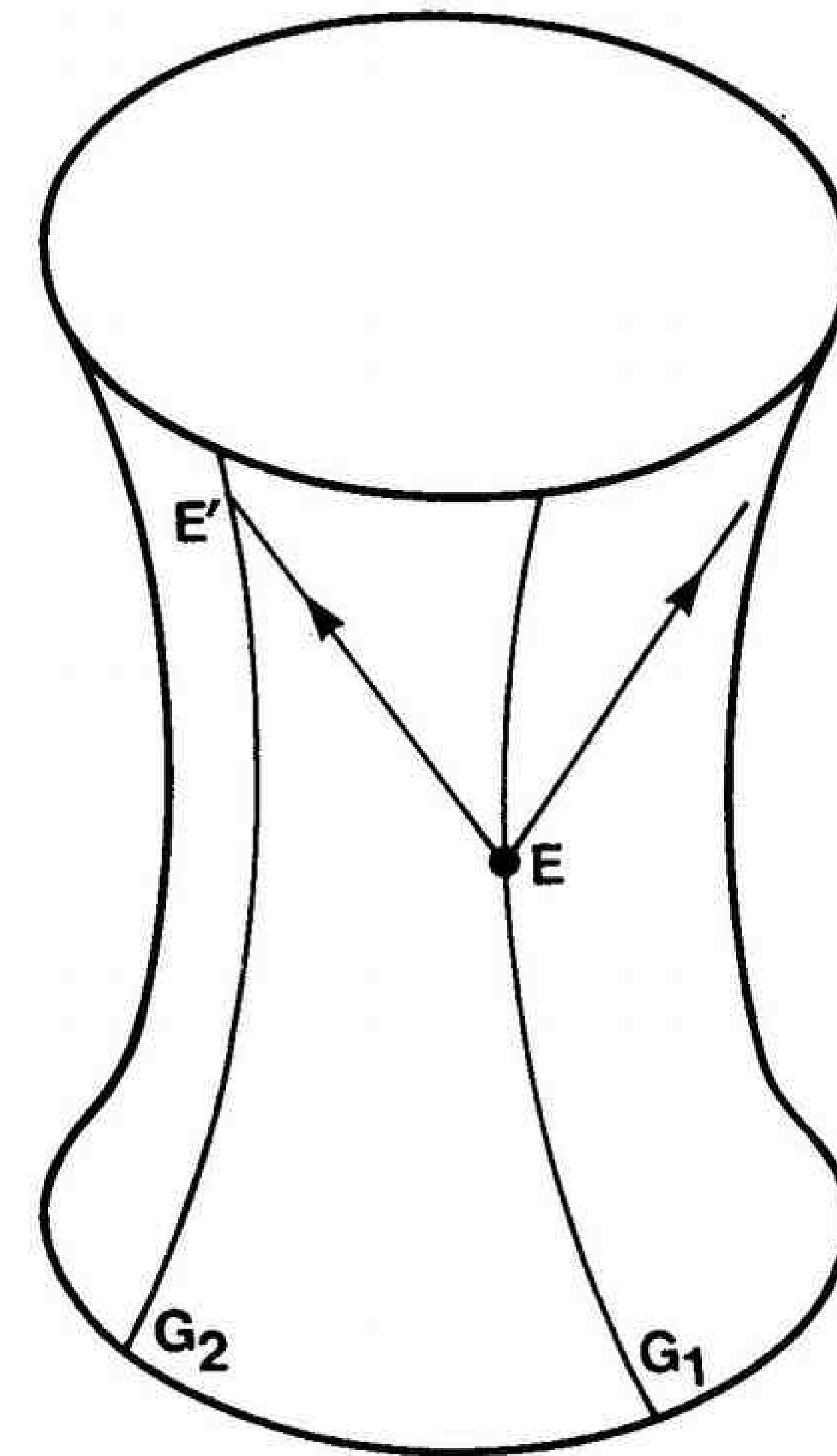


Fig. 48. En algún instante en la historia de la galaxia G_1, se emitió un flash de luz. La luz viaja en todas las direcciones (solamente podemos representar dos de ellas en nuestro diagrama) según las líneas rectas de las "tiras" de la figura 47. Al llegar a la galaxia G_2 en el suceso E', la luz ha sufrido un corrimiento hacia el rojo dado que G_1 y G_2 se alejan debido a la expansión de su Universo.

tructores de muebles, y desde luego los asientos hiperboloides, hechos de tiras de mimbre, son muy comunes. La disposición de estas tiras se muestra en la figura 47.

En el modelo de Universo de De Sitter, las líneas rectas que ocupan las posiciones de las tiras de mimbre en el taburete representarían las trayectorias de los rayos de luz en el espacio. La figura 48 muestra dos pulsos de luz emitidos en dos direcciones opuestas por un suceso E perteneciente a la línea de universo de una galaxia. Por lo tanto, los rayos de luz son líneas rectas aunque la superficie en la que están esté curvada.

Supongamos que tenemos dos galaxias cercanas G_1 y G_2 (véase figura 48). Se pueden enviar señales de luz entre ellas; en realidad, así es como los habitantes de una de ellas pueden ver a los de la otra. Pero como el Universo de De Sitter se expansiona, las dos galaxias se alejan cada vez más rápidamente una de otra. Este alejamiento hace que cambie la longitud de onda de la luz que va de una galaxia a otra, ya que como el espacio se dilata, también lo hacen las ondas de luz. En consecuencia, la luz que se recibe se vuelve algo más roja debido a la expansión. (La luz roja tiene una longitud de onda larga.) De hecho, fue este enrojecimiento característico de la luz de las galaxias lejanas lo que llevó a Hubble a deducir que el Universo estaba en expansión.

Cuanto más se alejan las galaxias, mayor es la velocidad de este alejamiento y mayor es el enrojecimiento de la luz. Los modernos telescopios pueden detectar galaxias a miles de millones de años luz de distancia, las cuales se alejan a una velocidad equivalente a un porcentaje apreciable de la de la luz, y la longitud de onda de su luz se dilata en varias veces su valor normal. Llegará un punto en que las dos galaxias G_1 y G_2 estarán tan lejos que el corrimiento de la luz las dejará fuera del espectro visible, y los habitantes de una galaxia ya no podrán ver a la otra. Cuando la velocidad de expansión supera a la de la luz, la longitud de onda se dilata infinitamente y desaparece toda posibilidad de comunicación. La situación recuerda a un agujero negro, en el que toda comunicación cesa en el horizonte de sucesos a causa del corrimiento infinito hacia el rojo.

Otra idea del horizonte de sucesos aparece cuando consideramos la geometría hiperboloide en el espacio de De Sitter. Supongamos que en un instante dado, E_1, se emite una señal luminosa en la galaxia G_1 en dirección a la galaxia cercana G_2 (véase figura 49). Cuando se recibe en G_2 la señal, algo enrojecida, ésta rebota hacia G_1. Al cabo de un tiempo llega de nuevo a G_1 en el suceso E_3, y por entonces las galaxias se han separado mucho y se alejan muy deprisa la una de la otra. En consecuencia, la señal ha experimentado a su regreso un fuerte corrimiento hacia el rojo. Si la señal rebota de nuevo en dirección a G_2, vemos en la figura 48 que no llegará nunca. El rayo de luz pasa exactamente "por encima" de la línea de Universo de G_2 y nunca la intersectará. Estará siempre más allá del infinito futuro de G_2. Por lo tanto, por mucho que se espere el suceso E_3 nunca llegará a influir sobre lo que le ocurra a G_2. Por lo tanto, para una predicción completa del comportamiento futuro de un sistema, en el Universo de De Sitter sólo se requiere el conoci-

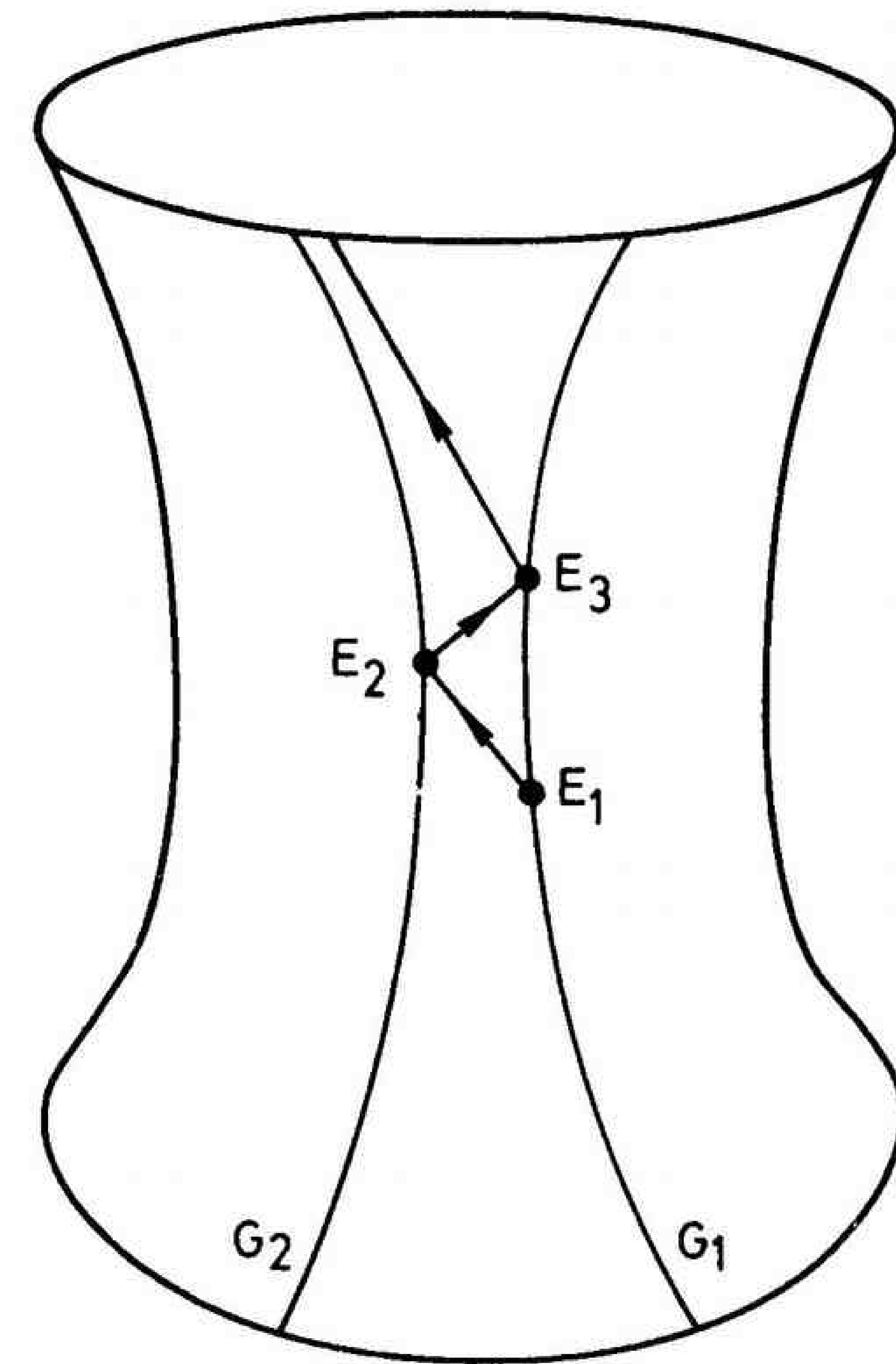


Fig. 49. *El horizonte en el espacio de De Sitter.* Las sucesivas señales de luz entre G_1 y G_2 suponen un progresivo enrojecimiento de la luz en cada recepción. La última señal desde G_1, enviada en el instante E_3, nunca llegará a G_2; pasa exactamente "por encima" del futuro de G_2. Se pierde toda comunicación entre G_1 y G_2.

miento de lo que ocurre en un instante dado en una parte limitada del Universo. Se pueden ignorar sucesos como el E_3 que están más allá del horizonte de sucesos de G_2. De igual manera se pueden ignorar los sucesos que ocurren en el interior de un agujero negro en relación a lo que ocurre en el exterior, ya que aquéllos no pueden ejercer influencia alguna fuera del horizonte de sucesos.

El Universo de De Sitter está, pues, más libre de "influencias externas" que el que pensaba Laplace. Los problemas de causa y efecto aparecen cuando en lugar del espacio de De Sitter se considera

un modelo de Universo relacionado con él en el cual el hiperboloide de la figura 46 se inclina sobre su lado, de manera que ahora el tiempo transcurre en círculo alrededor de la superficie cerrada (de la que hablaremos a continuación), mientras que el espacio queda representado por las secciones hiperbólicas horizontales infinitas (véase figura 50). Así, en este modelo, denominado en ocasiones espacio anti-De Sitter, el espacio se extiende infinitamente, al revés que en el caso del espacio de De Sitter que hemos considerado antes.

En el espacio anti-De Sitter las "tiras" todavía tienen el papel de rayos de luz, pero su relación con las líneas de universo galácticas es diferente dado que ahora dan la vuelta al círculo de la hoja. Evidentemente, todo rayo de luz intersectará en algún lugar a toda la galaxia, ya que las líneas de universo de las galaxias también dan la vuelta a la superficie. Por lo tanto, no hay horizonte de sucesos. La sorpresa aparece cuando consideramos todo el espacio en un instante de tiempo, lo cual se representa mediante un corte horizontal. La línea hiperbólica resultante se extiende infinitamente en ambas direcciones (izquierda y derecha en el diagrama), pero a pesar de esto habrá algunos rayos de luz que no intersectan esta línea hiperbólica. En el espacio de De Sitter, las hipérbolas son líneas de universo galácticas, y los círculos representan el espacio en un instante dado. Allí son las líneas de universo las que "no encuentran" a algunos rayos de luz, y esto lleva a un horizonte de sucesos. En el espacio anti-De Sitter, los papeles del espacio y del tiempo están intercambiados, de manera que ahora son las secciones espaciales las que "no encuentran" a los rayos de luz.

¿Qué significa esto físicamente? Consideremos una galaxia G (véase figura 51) y el estado de todo el Universo infinito en un instante, simultáneo al suceso E_1 de la línea de universo de G. En el modelo de Universo de Laplace, esta información habría sido suficiente para predecir por completo el futuro de G, ya que en este instante el Universo contendría todas las influencias causales que pudieran llegar a G. Pero en el espacio-tiempo anti-De Sitter las cosas son muy diferentes. El corte espacial se curva por debajo de los rayos de luz señalados con una L, de manera que, incluso conociendo el estado de todos los átomos y los pulsos de luz en el instante E_1, sería insuficiente para predecir lo que le ocurrirá a la galaxia G después del suceso E_2, cuando los rayos de luz L, y los posteriores, traigan sus influencias desde "más allá del espacio infinito".

Para concretar más estas ideas tan abstractas, supongamos que en G hay un observador paranoico que acumula toda la informa-

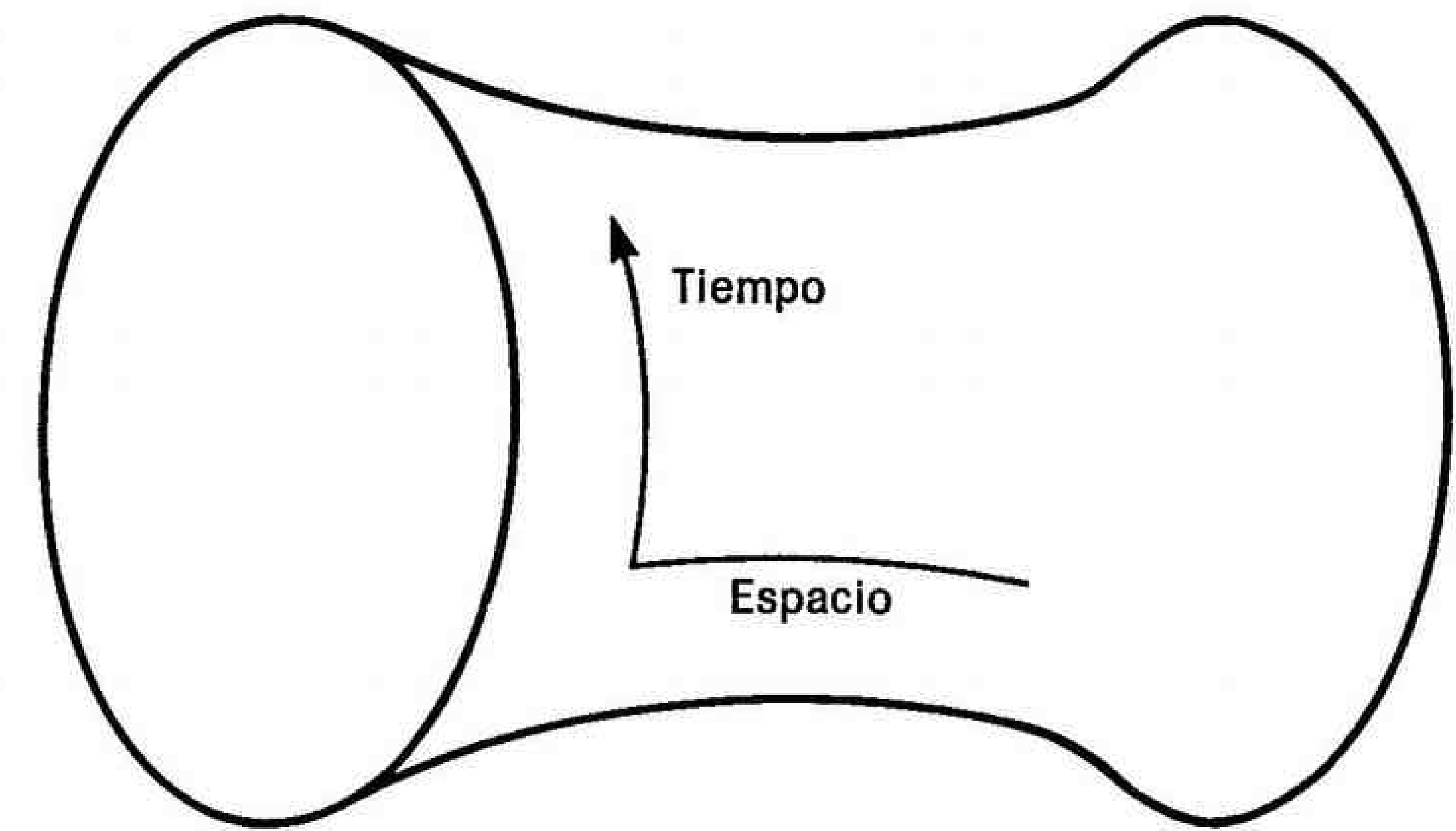


Fig. 50. *Espacio anti-De Sitter.* Este modelo de Universo es similar en forma al de De Sitter, pero con el hiperboloide sobre su lado. El espacio (cortes horizontales) es ahora infinito, pero el tiempo (cortes verticales) es circular, es decir, de duración finita.

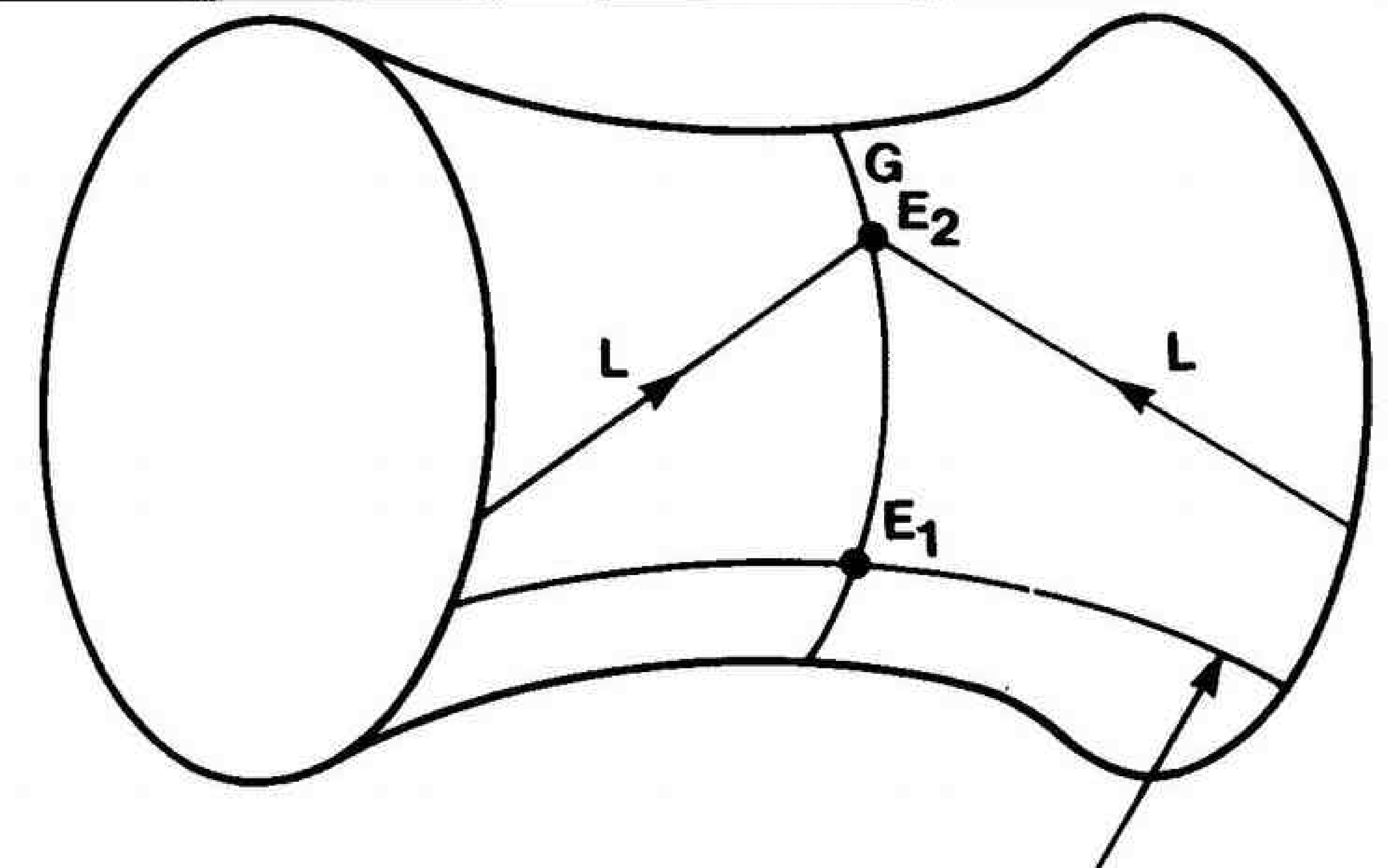


Fig. 51. *Colapso de causa y efecto.* El suceso E_2 (por ejemplo, la pulverización de un observador por los pulsos de luz L) no debe su origen a ningún suceso, en ningún lugar del espacio, en el primer instante en que el observador toma simultáneamente a E_1. El origen de los pulsos de luz debe buscarse "más allá del espacio infinito".

ción que puede sobre el Universo para así poder evitar cualquier posible amenaza. Incluso sabiéndolo todo sobre todos y cada uno de los átomos del Universo en un instante (lo cual de cualquier manera es imposible de saber directamente, ya que debería esperar a que la información le llegara a la velocidad de la luz), no podría asegurar que al cabo de un cierto tiempo no llegará un pulso de luz del espacio y lo pulverizará.

Este extraño modelo del espacio-tiempo, en el cual pueden aparecer influencias literalmente a partir de la nada –desde más allá del infinito– implica una especie de intervención divina. En lugar de considerar que el comportamiento de cada objeto tiene su origen causal en un suceso anterior, aparece ahora la posibilidad de que ocurran cosas cuyas causas no pueden remontarse a nada de *lo que ya ha ocurrido*. Se rompe la cadena de causa y efecto. Veremos que esta característica aparece también en las singularidades desnudas.

Antes de abandonar el espacio-tiempo anti-De Sitter debemos hacer unas consideraciones sobre la particular naturaleza del tiempo en este modelo. Como ya hemos dicho, las líneas de universo de las galaxias dan la vuelta a la hoja e incluso podrían juntarse consigo mismas formando círculos. Esto quiere decir que el tiempo es cerrado, y que el pasado es también el futuro, situación que ya discutimos brevemente en el capítulo 3. Un hecho así parece llevar al caos causal; por ejemplo, sería posible conocer el futuro archivando el pasado, incluso a pesar de que no podemos predecir el futuro a partir de un perfecto conocimiento del presente.

Volviendo al tema de las singularidades desnudas es fácil ver que comparten algunas de las desagradables características asociadas con el espacio anti-De Sitter. La figura 36(ii) muestra un diagrama de espacio-tiempo en el cual una estrella colapsa formando no un agujero negro sino una singularidad desnuda. Suponiendo que no vivimos en un Universo como el del modelo anti-De Sitter, el comportamiento de la estrella hasta el momento en que se forma la singularidad está determinado de forma total y precisa por el estado del Universo y los sucesos anteriores. Pero después de formarse la singularidad sobreviene el desastre. Toda la física queda destruida en la singularidad y no es posible saber qué influencias pueden salir de ella. No podemos predecir lo que ocurrirá con una singularidad.

De la misma forma que las influencias fluyen hacia el espacio anti-De Sitter desde los "lados" del espacio-tiempo (es decir, "más allá del infinito"), cuando estamos ante una singularidad desnuda pueden emerger de ella, es decir, de más allá del borde del espacio-

tiempo, influencias incontrolables. Una singularidad es el límite del espacio físico, un lugar por donde pueden invadir el Universo influencias totalmente impredecibles. Pero mientras que en el espacio anti-De Sitter estas influencias vienen de más allá del infinito, aquí aparecen en un sitio perfectamente determinado.

El hecho más inquietante en una singularidad desnuda es que ésta parece señalar el final de la ciencia y de cualquier comportamiento ordenado del Universo. Ante nosotros aparece algo que no está sujeto a ninguna ley de la naturaleza –donde toda ley es destrozada por la rotura del espacio-tiempo– y además está al descubierto, capaz de influir sobre lo que sucede a su alrededor. ¿Estamos ante la receta de la anarquía cósmica?

Vimos que antiguamente los hombres invocaban a los dioses como causa de lo impredecible y consideraban al mundo como un lugar temperamental, lleno de acontecimientos caprichosos y aleatorios. Más tarde, con el desarrollo de la ciencia, se llegó a contemplar una naturaleza sujeta a leyes y un Universo organizado según unos principios matemáticos estrictos. Y ahora, con la amenaza de una singularidad desnuda, volvemos de nuevo al caos de la antigüedad: un Universo en el cual puede ocurrir cualquier cosa.

¿Qué podemos decir sobre un Universo que contenga una singularidad desnuda? ¿Cómo sería? La pregunta, en cierto sentido, no tiene respuesta por definición, ya que en un mundo tal no se puede predecir nada. No obstante, podemos imaginar una serie de posibilidades. En primer lugar, está la singularidad totalmente caótica. En este caso, las influencias que entran en el Universo por la singularidad son totalmente desordenadas. La materia y la energía emergen por ella de forma aleatoria, esparciéndose por el Universo circundante. A medida que la materia ordenada, como las estrellas y los planetas, va cayendo en la singularidad, engullida por su inmensa gravedad, hay un flujo hacia afuera de átomos sin estructurar y de radiación, como si se tratara de una bomba en constante explosión. El efecto neto de esta lluvia de energía es la creación de una especie de ruido de fondo en el cual el comportamiento de otros objetos vecinos se ve perturbado de forma impredecible, pero no espectacular. De hecho, los efectos de este ruido disminuyen a medida que nos alejamos de la singularidad. Un objeto como éste, que representa la clase más benigna de singularidad desnuda, podría existir fácilmente en algún lugar del Universo sin que nos diéramos cuenta.

El siguiente escenario supone que las influencias que aparecen

están parcialmente organizadas. Podríamos imaginarnos una especie de mundo como el de Alicia en el País de las Maravillas en el cual la singularidad emite toda clase de objetos fantásticos y extraños: estrellas, planetas, gente, aparatos microelectrónicos, copias de la *Enciclopedia Británica*. En un Universo sin ley puede ocurrir cualquier cosa. No cabe duda de que podríamos considerar a un objeto como éste del mismo modo que nuestros antepasados consideraban a la Divinidad. Al fin y al cabo, demostraría una especie de comportamiento inteligente y sería capaz de interferir en el funcionamiento del Universo de manera organizada. Al mismo tiempo desempeñaría hasta cierto punto el papel de un creador determinado, tomando los restos que caen hacia él y devolviendo objetos ordenados y estructurados.

Un tercer escenario eleva a la singularidad desde este papel de artesano local al de supremo arquitecto. En este caso la singularidad controla en gran manera al Universo y proporciona mucho más que una variedad de objetos diferentes. Actúa totalmente como un mecanismo cósmico de rejuvenecimiento.

En mi libro *El Universo desbocado* explico cómo todo el Cosmos se desintegra lenta pero constantemente, al ir debilitándose toda estructura organizada y toda actividad elaborada. Esta inevitable muerte del Universo se conoce desde hace un siglo y es una consecuencia del llamado segundo principio de la termodinámica que, en su forma más general, establece que en todo proceso natural aumenta el grado de desorden del Universo. Abundan los ejemplos de esta tendencia general: la gente se hace vieja, las casas se caen, las montañas se erosionan, las estrellas agotan su combustible. Ciertamente hay ejemplos de sistemas que aumentan su orden progresivamente, como por ejemplo la organización social, pero ello es a expensas de un mayor grado de desorden en otros sistemas (como, por ejemplo, el agotamiento de los recursos naturales). En cualquier caso, cuando se pasa balance gana el desorden. Todo el Universo marcha irreversiblemente hacia el caos total.

La degeneración más notable en el Cosmos es el agotamiento del combustible de las estrellas. Éstas proporcionan la energía que genera la mayor parte de la actividad que nos rodea. El Sol, por ejemplo, acciona a la biosfera de la Tierra, así como al clima y otros procesos tales como los cambios en la atmósfera. A medida que el Sol va consumiendo su combustible se acerca más el día en que lo habrá agotado por completo y se convertirá en un objeto frío y compacto. Para estrellas más masivas la última etapa de este proceso es un agujero negro, el objeto de mayor desorden que se conoce, ya que nada sobrevive a un encuentro con él. Cuando un objeto cae en un agujero negro toda información sobre aquél queda borrada para siempre.

Estas consideraciones tan deprimentes han llevado a muchos científicos a suponer que en un futuro inimaginablemente lejano, el Universo será un residuo agotado sin interés ni utilidad alguna. Sin embargo, todo esto podría ser modificado por una singularidad desnuda. De este objeto podría emanar toda la organización necesaria para darle cuerda de nuevo al Universo y mantenerlo en marcha.

Es divertido considerar en detalle la forma en que esto podría suceder. La singularidad desnuda actuaría como una especie de máquina de reciclaje hacia la cual iría cayendo el material de las estrellas viejas y agotadas, para desaparecer del espacio-tiempo, y ser reemplazado por gas hidrógeno nuevo que se iría vertiendo en el Cosmos para formar nuevas estrellas que pasarían por sus propios ciclos de vida. Evidentemente, debería establecerse un balance de manera que el ritmo de caída y de salida fuera igual en promedio.

No está nada claro cómo podría funcionar todo esto en la práctica, ya que el material debería tanto caer como emerger de nuevo en el mismo objeto. Parece difícil que un sistema así pueda funcionar en un Universo en expansión. A pesar de esto, hace unos años que el prestigioso cosmólogo George Ellis propuso un modelo de Universo conteniendo una singularidad desnuda como mecanismo de reciclaje, modelo que el autor mantenía que proporcionaba una descripción del Universo real casi tan buena como el modelo convencional.

El Universo de Ellis se parece más bien al cilindro que consideramos anteriormente en este capítulo, con la diferencia de que la Tierra estaría situada en un lado y la singularidad desnuda en el otro. No habría expansión cósmica. En cambio, las galaxias estarían dispuestas de forma muy irregular, con mucho material amontonado alrededor de la singularidad y muy poco cerca de la Tierra. El efecto de esta distribución de materia produciría un corrimiento hacia el rojo de la luz que, en la Tierra, tendría las mismas características que si las galaxias se estuvieran alejando.

La explicación para el corrimiento hacia el rojo es fácil de entender. Ya explicamos en el capítulo 3 que la luz se cansa a medida que va subiendo contra la gravedad, y se vuelve más roja en el proceso. En el modelo convencional de Universo esto no le ocurre a la luz que viaja por entre las galaxias, ya que éstas están distribuidas

de forma prácticamente uniforme, y por lo tanto las fuerzas gravitatorias en diferentes direcciones se cancelan entre sí. No hay un "arriba" o "abajo" especial. Por contra en el Universo de Ellis la materia se acumula alrededor de la singularidad, de manera que la luz que abandona esta región experimenta una gran fuerza de resistencia debida a la gravedad de las masas acumuladas. Por lo tanto, sufre un corrimiento hacia el rojo. Recíprocamente, la luz que sale de la Tierra y cae hacia la singularidad experimenta un corrimiento hacia el *azul*, gana energía a medida que se precipita hacia el centro gravitatorio. En consecuencia, hay una relación asimétrica entre la región del espacio cercana a la Tierra y lo que podríamos considerar como nuestros antípodas cósmicos, la concentración de materia alrededor de la singularidad, situada en el extremo opuesto del Universo. Las galaxias amontonadas alrededor de la singularidad nos parecen todas rojas, pero la Vía Láctea le parecería azul a un observador situado en una de aquéllas.

El motivo por el cual no se acude a este tipo de distribución no uniforme de galaxias para explicar el corrimiento hacia el rojo cosmológico descubierto por Hubble es que requiere una situación muy especial de la Tierra. Sabemos por la observación que todas las galaxias que nos rodean, en todas las direcciones, parecen rojas. En el Universo de Ellis esta simetría solamente ocurre en la región de los antípodas cerca de la singularidad, es decir, en un lugar especial. Desde que Copérnico desposeyó a la Tierra de su lugar central en la creación, ha sido un anatema para los científicos suponer que nuestra situación en el Cosmos es de alguna forma privilegiada. En el modelo convencional de Universo en expansión que hemos descrito anteriormente en este capítulo, *todas* las galaxias observan el corrimiento hacia el rojo de sus vecinas, ya que todas se alejan las unas de las otras. En consecuencia la Vía Láctea (nuestra galaxia) no necesita ningún privilegio para observar los corrimientos hacia el rojo en todas las direcciones.

Para "explicar" por qué la Vía Láctea está situada precisamente cerca de los antípodas de la singularidad desnuda en su modelo de Universo, Ellis señala que las condiciones físicas necesarias para la existencia de vida solamente se encuentran lejos de la singularidad, que está muy caliente. Por lo tanto, no es sorprendente que, como observadores inteligentes, nos encontremos viviendo en esta particular región del Cosmos: es la única región que es habitable.

Ellis supone que los elementos pesados, como el hierro, que representan las cenizas del combustible nuclear de las estrellas, se ven

arrojados de alguna forma al espacio (por ejemplo, en las explosiones de *supernovas*) y lentamente se dirigen hacia la singularidad, donde desaparecen de la existencia, para ser reemplazados por hidrógeno nuevo. De esta forma, el Universo consigue una longevidad infinita, y la singularidad actúa como si fuera un sistema de mantenimiento de la vida permanente e inagotable.

Desde luego, se supone que este modelo de Universo no se toma en consideración de forma demasiado seria. Cuando tratamos con singularidades desnudas, se puede especular que cualquier cosa es posible. La singularidad podría, en principio, controlar todo lo que ocurre en el Universo hasta el más ínfimo detalle.

Si existen de verdad las singularidades desnudas, ¿cómo nos encaramos con lo desconocido? Si mañana se formara una de ellas cerca de la Tierra, ¿se convertiría el mundo en un manicomio, un surtido desenfrenado de sucesos aleatorios sin causa, de forma que no podríamos en ningún instante saber lo que va a ocurrir al siguiente? ¿Se desatarían fuerzas que destruirían el Universo, o le proporcionarían vida ilimitada?

Solamente un reducido grupo de científicos ha estudiado en detalle la naturaleza de las singularidades y no hay acuerdo alguno en la respuesta a preguntas de este tipo. Hawking ha propuesto que, siendo la singularidad un objeto completamente fuera de toda ley, originaría influencias absolutamente caóticas y aleatorias. Podría ser entonces que no fuera muy diferente de un quasar, que es muy compacto, extremadamente energético y emite grandes cantidades de energía desordenada. En tal caso, una singularidad desnuda suficientemente alejada de la Tierra no tendría mayores consecuencias para nosotros que todas las otras influencias aparentemente aleatorias que nos llegan desde una gran distancia. Es necesario recordar que incluso si pudiéramos predecir el futuro, en la práctica no podríamos tener suficiente información sobre las galaxias distantes para hacerlo. En el mundo real no hay más remedio que asumir de cualquier modo los riesgos de todo lo que el Universo nos puede mandar. En este sentido una singularidad caótica no es diferente de aquello a lo que estamos acostumbrados.

Se puede comparar la situación con un sistema electrónico sobre el cual el oyente no tiene ningún control. Puede tocar cualquier cosa. Un sistema ordenado puede emitir un concierto de Mozart, un sistema parcialmente ordenado, crear fragmentos de conversaciones y un sistema desordenado produciría ruido blanco. Hawking imagina una singularidad como un sistema generador de ruido blanco, no

de sonido sino de luz, calor, partículas subatómicas y cualquier otro tipo de influencia material o radiactiva.

En cierto sentido el caos total es como una ley, ya que si sabemos que la singularidad desnuda produce ruido blanco, sabemos algo sobre su comportamiento estadístico medio, la ausencia total de correlaciones. No debe preocuparnos la posibilidad de que produzca una copia idéntica del lector, o un trozo de antimateria que nos aniquile, ya que ello requeriría de un alto grado de cooperación y organización. En este sentido la singularidad desnuda está controlada. Enfrentémonos con ella resueltamente, y en lugar de esperar que no ocurra nunca, la consideraremos como parte de la naturaleza, una fuente de ruido blanco. De esta forma se convierte en una entidad prácticamente inofensiva.

¿Cómo podemos saber lo que podría salir de una singularidad desnuda? ¿Tiene razón Hawking en que son sistemas completamente desodernados, que bañan el Universo de influencias aleatorias sin grandes amenazas, o es correcta la extraordinaria idea de Ellis, de una singularidad desnuda que inyecta orden en el Cosmos en una revitalización continua? ¿O bien es de esperar la aparición del manicomio, con la entrada en escena por el mundo de toda clase de efugios y de rarezas?

Afortunadamente tenemos alguna información, más que limitada, sobre lo que puede salir de una singularidad. En el próximo capítulo veremos que el propio Universo se originó en una singularidad desnuda.

8. La creación del Universo

En la mayoría de las culturas occidentales ha predominado siempre la creencia en alguna forma de creación. El solo hecho de que el hombre pueda multiplicarse y llenar territorios vacíos debe haber puesto de relieve que antiguamente había menos gente, de manera que era natural suponer que ha habido un primer hombre y una primera mujer de los cuales ha derivado toda la humanidad. Como siempre se consideraba al hombre como el fin y la culminación del Universo físico, no era nada difícil que las antiguas culturas dieran por sentado que el resto del Universo había sido creado junto con el hombre o inmediatamente antes que él.

Hoy en día tenemos evidencias científicas directas de que el hombre ha habitado la Tierra únicamente durante unos pocos millones de años, si bien sabemos que nunca existió un "primer hombre" en el sentido religioso antiguo. Se puede seguir en detalle la evolución de bioformas complejas a partir de sus antecesores más simples hasta restos fósiles de más de tres mil millones de años de antigüedad. Además, los análisis radiactivos han establecido que la Tierra tiene una edad de aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, mientras que se piensa que el Sol es algo más viejo. Antes de ello, no existía el sistema solar.

¿Cuántas otras características del Universo que hoy conocemos no existían en el pasado remoto? Se sabe que otras muchas estrellas de nuestra región de la Vía Láctea tienen una edad comparable a la del Sol. Desde la Segunda Guerra Mundial los astrónomos han adquirido un conocimiento detallado de cómo nacen, evolucionan según un ciclo de vida preciso, y finalmente mueren las estrellas. Hay muchos lugares en el firmamento, algunos observables a simple vista, en los cuales se están contrayendo lentamente grandes nubes de gas hidrógeno por la acción de la gravedad, fragmentán-

dose y formando enormes bolas brillantes, cubiertas por nebulosidades filamentosas, que formarán la próxima generación de estrellas. Es probable que el Sol se formara de esta manera, entre un verdadero conglomerado de estrellas que finalmente se dispersaron por la galaxia, hace así como unos cinco mil millones de años.

Hace unos doscientos años los científicos no tenían una verdadera comprensión del concepto de energía, que recientemente ha tomado una importancia tan fundamental en nuestras vidas. Parecía perfectamente natural que el Sol y las estrellas continuaran emitiendo indefinidamente calor y luz, sin necesidad de que hubiera fuente alguna. Hoy en día sabemos que esta enorme producción de energía debe ser suministrada de alguna manera, y con el descubrimiento de los procesos nucleares se obtuvo una explicación de cuál era la fuente de alimentación del Sol y las estrellas. En consecuencia quedó claro que el combustible nuclear que mantiene en funcionamiento a las estrellas, al igual que cualquier otro combustible, se agotará en el futuro. El destino posterior de la estrella agotada fue descrito en detalle en el capítulo 5.

El hecho de que el combustible nuclear no sea inagotable implica evidentemente que las estrellas no pueden haber existido desde siempre, y la medición del ritmo de consumo de combustible y las reacciones nucleares que liberan energía demuestra que incluso las estrellas más viejas no tienen probablemente más de diez mil millones de años. Con los resultados de los estudios sobre la radiactividad y la evolución nuclear, los astrónomos han llegado a la conclusión de que la Vía Láctea tiene entre diez y doce mil millones de años. Este valor parece ser también típico de otras galaxias.

Este valor de algo más de diez mil millones de años es un resultado asombroso. En el capítulo anterior explicamos cómo el astrónomo Edwin Hubble descubrió, a finales de los años 20, que las galaxias se alejaban sistemáticamente las unas de las otras, fenómeno que se explica fácilmente en el contexto de la teoría de la relatividad de Einstein como una dilatación o expansión del espacio intergaláctico. Midiendo la velocidad de alejamiento de varias galaxias a diferentes distancias es fácil deducir la velocidad de expasión del Universo. Con el actual ritmo de expansión el Universo observado tendrá el doble de su tamaño actual en unos veinte o treinta mil millones de años. Por el contrario, hace diez mil millones de años, cuando nacieron las galaxias, debía tener un tamaño considerablemente más pequeño que el actual.

Es evidente que si las galaxias se están alejando actualmente, deben haber estado más cerca unas de otras en el pasado, ¿pero a qué distancia estaban? ¿Podemos estar seguros de que la actual velocidad de expansión galáctica ha sido típica de todas las épocas cósmicas, o bien el Universo se expansionó más rápida o más lentamente en el pasado?

Los astrónomos han afrontado estas cuestiones de dos maneras. La primera es mediante la observación directa. La luz viaja a 300.000 kilómetros por segundo. Si bien ésta es una velocidad extraordinaria según patrones humanos, la escala de distancias astronómicas es tan inmensa que la luz tarda una cantidad enorme de tiempo para viajar entre las galaxias. Por ejemplo, una de nuestras galaxias vecinas, Andrómeda, está a unos dos millones de años luz, lo cual quiere decir que la luz tarda dos millones de años en llegar desde Andrómeda hasta nosotros. En otras palabras, cuando observamos Andrómeda, la vemos tal como era hace dos millones de años. En el otro extremo de la escala, los lejanos objetos astronómicos conocidos con el nombre de quasars están a varios miles de millones de años luz de distancia, y la luz mediante la cual los vemos hoy en día salió de estos objetos antes de que la Tierra existiera.

Debido al tiempo que la luz emplea en viajar, un telescopio permite a los astrónomos mirar muy hacia atrás en el Universo pasado. Pueden examinar, entre otras cosas, la velocidad de expansión cósmica en el pasado y ver si difiere de la velocidad actual. En principio esta labor es muy fácil, pero existen complicaciones técnicas. Los objetos muy lejanos –que son aquellos de los cuales recibimos la luz más antigua– son también los más débiles, y en consecuencia también los más fácilmente pasados por alto. Hay una tendencia natural a seleccionar sólo los objetos más desusadamente brillantes. El problema es que la única manera de saber la distancia a un quasar o a una galaxia lejana puede ser observando lo brillante que es. Evidentemente, un objeto luminoso de un brillo intrínseco determinado parece más débil cuanto más lejos esté, las luces de un coche a quince kilómetros de distancia son mucho menos brillantes que una vela en la habitación en que estamos. Desgraciadamente, no todas las galaxias (ni tampoco todos los quasars) tienen el mismo brillo intrínseco; algunas son mucho más luminosas que otras, incluso teniendo la misma forma y el mismo tamaño. Si mediante una selección aleatoria se toma una mayor proporción de las más brillantes, que son las más fácilmente observables, tenderemos a obtener un valor menor que el real para su distancia a la Tierra.

Además de los errores introducidos por los efectos de selección,

no se sabe con mucha exactitud cómo varía la luminosidad intrínseca de las galaxias con el tiempo. No se puede suponer de entrada que una galaxia típica fuera tan luminosa en el pasado como lo es ahora, de manera que esto también complica la estimación de la distancia, y consecuentemente el cálculo de la época en la cual los astrónomos están observando realmente el objeto. A pesar de todos estos problemas ha existido un acuerdo general (con la excepción de algunas discrepancias recientes) en que la velocidad de expansión disminuye lenta y sistemáticamente –el Universo se está ralentizando–. Pero todavía no se conoce el ritmo de desaleración con la exactitud necesaria como para predecir si es suficiente para que en algún momento del futuro lejano se detenga la expansión.

Una expansión con desaceleración es exactamente lo que se espera a partir del segundo método mediante el cual los astrónomos han estudiado el movimiento cósmico, utilizando modelos matemáticos basados en la teoría de la gravedad. Como ya se explicó en el capítulo 4, la gravedad es una fuerza puramente atractiva (exceptuando quizás algunas situaciones exóticas). Por lo tanto, las fuerzas gravitatorias que actúan entre las galaxias intentarán que se atraigan unas a otras, de la misma forma que el material de cada galaxia se mantiene unido. A medida que las galaxias se alejan, las fuerzas gravitatorias intergalácticas van frenando su movimiento, disminuyendo sistemáticamente su energía de expansión. Por lo tanto, este movimiento de expansión irá disminuyendo con el tiempo. Es como un cohete lanzado desde la Tierra hacia el espacio. La nave abandona la Tierra a gran velocidad, pero a medida que sube alejándose hacia el espacio, la Tierra intenta atraerlo y esto hace que el cohete vaya disminuyendo gradualmente su velocidad, y consiguiendo quizá hacer caer al cohete.

Aparte de esto, sabemos que la gravedad disminuye con la distancia, de acuerdo con la ley del inverso del cuadrado de la distancia explicada en el capítulo 1. Esto quiere decir que en el pasado, cuando las galaxias estaban más cerca las unas de las otras, su atracción gravitatoria mutua debió de ser mucho mayor que ahora, y el ritmo de desaceleración de la expansión aún más pronunciado. Por lo tanto, la gravedad se oponía al alejamiento de las galaxias mucho más fuertemente hace varios miles de millones de años que en la actualidad. En consecuencia, la velocidad de expansión debió de ser entonces mucho mayor para que las galaxias pudieran escapar de su mutua atracción gravitatoria impidiendo que cayeran las unas sobre las otras.

Teniendo en cuenta que la velocidad de expasión del Universo ha estado disminuyendo sistemáticamente, es evidente que hace doce mil millones de años, cuando se estaban formando las galaxias, el Universo debió de estar mucho más contraído de lo que sugieren las estimaciones basadas en la velocidad de expansión actual. De hecho, la mayoría de los astrónomos están de acuerdo en que en alguna época, hace entre doce y dieciocho mil millones de años, el Universo estaba tan contraído que no era posible distinguir galaxias individuales al estar todas muy cerca unas de otras, prácticamente sin espacio intergaláctico. El hecho de que la época en la cual comenzaron a separarse las galaxias, estimada a partir de las medidas de la velocidad de expansión cósmica, coincida con la edad de las galaxias, calculada a partir de los estudios sobre la radiactividad y la evolución estelar, constituye una notable confirmación de que estas ideas cosmológicas básicas son correctas. Hubo una época, hace unos quince mil millones de años, en la cual no existían galaxias.

Hemos llegado a una interesante imagen del Universo primitivo, que no tenía los espacios vacíos que caracterizan la situación actual. En su lugar, todo el Cosmos estaba lleno de gas, más o menos uniformemente distribuido. A medida que se fue desarrollando la expansión del espacio se produjeron "roturas" en el gas y comenzaron a separarse los precursores de las actuales galaxias. Con el tiempo, las grandes masas de gas que se habían separado se contrajeron bajo el peso de su propia gravedad y formaron las galaxias que vemos actualmente. Las "roturas" se abrieron formando vacíos, que constituyen las grandes regiones vacías que existen hoy en día, mayores incluso que las propias galaxias. La mayor parte del Universo es hoy en día un vacío intergaláctico, que contiene como máximo sólo un gas extremadamente tenue.

¿Qué podemos decir sobre el estado del Cosmos que precedió a la aparición de las galaxias? A partir de lo que hemos dicho es evidente que los gases pregalácticos debieron de expansionarse mucho más rápidamente que en la actualidad. No es difícil explorar hacia atrás en el tiempo y calcular qué tamaño debió de tener en un instante dado un volumen concreto del Universo actual, y estimar la velocidad de expansión que hubo de tener para evitar el colapso gravitatorio.

Una unidad adecuada de trabajo es el volumen total del Universo actualmente accesible con los modernos telescopios. Esto supone aproximadamente un millón de billones de billones (10^{30}) de años luz cúbicos, siendo cada año luz cúbico de varios miles de billones

de billones de billones de kilómetros cúbicos (10^{39}). En este volumen de espacio hay muchos miles de millones de galaxias, cada una de las cuales contiene un promedio de cien mil millones de estrellas de masa comparable a la del Sol. La masa total de material es, pues, de unos cien billones de billones de billones de billones (10^{50}) de toneladas, con una densidad media de un gramo de materia por cada mil billones (10^{15}) de kilómetros cúbicos, o lo que es lo mismo de un átomo por cada mil litros.

Empecemos situándonos muchos miles de millones de años antes de la separación de las galaxias, en una época en que el Universo que observamos actualmente ocupaba un volumen de una diez mil millonésima del que hemos mencionado arriba, y la velocidad de expansión era unas cien mil veces mayor que en la actualidad; el Universo doblaba su tamaño cada cien mil años. A medida que vamos hacia atrás en el tiempo, solamente cien mil años antes este mismo material estaba comprimido en un volumen treinta mil veces todavía menor, y la velocidad de explosión era cien millones de veces mayor que la actual. Evidentemente, el ritmo del cambio se acelera a medida que vamos hacia atrás en el tiempo. Sólo cien años antes todo el Universo que observamos hoy en día estaba comprimido en un volumen esférico de unos 30.000 años luz de diámetro, que es el volumen de espacio que ocupa la Vía Láctea actualmente. Si retrocedemos tan sólo un año antes nos encontramos con todo el extraordinario mundo que vemos –los miles de millones de galaxias, los 10^{-49} de toneladas de materia– llenando un volumen de unos diez años luz de diámetro y expansionándose a tal velocidad que su tamaño se dobla cada segundo.

Siguiendo la progresión matemática, el cambio se acelera cada vez más rápidamente. Un segundo antes la densidad de la materia llega ya a valores comparables a las densidades nucleares y así sucesivamente, hasta que todo el Universo que observamos en la actualidad está comprimido en un volumen del tamaño de un cubo y la velocidad de expansión es la de una verdadera explosión, doblando el tamaño en sólo una millonésima de una billonésima de una billonésima (10^{-30}) de segundo.

¿Hasta dónde podemos llegar yendo hacia atrás en el tiempo? La fórmula matemática nos dice que para instantes anteriores incluso más reducidos la compresión crece aún más rápidamente y que el ritmo de cambio es cada vez más impetuoso. Llevando las matemáticas a sus últimas consecuencias se llega al momento en que todo está concentrado en el mismo sitio, el Universo está contraído

en un punto matemático, y el enorme volumen que actualmente es accesible con nuestros telescopios se comprime a cero, y por lo tanto su contenido material se comprime hasta una densidad infinita. Esta situación recuerda el colapso de una estrella en un agujero negro, pero en sentido contrario, ya que esto es una expansión. Parece evidente que nos encontramos ante otra singularidad.

Antes de abordar el problema de si el Universo se ha expansionado a partir de una singularidad, es importante evaluar la evidencia observacional en la que se basa la suposición de que en la época anterior a la formación de las galaxias había una compresión acelerada. ¿Qué es lo que sabemos de las épocas primitivas que precedieron a las imágenes que recibimos en nuestros telescopios, capaces de mirar hacia atrás en el tiempo?

Si es cierto que el Universo inició su expansión en forma explosiva, debemos esperar que las primeras etapas estuvieran marcadas por una extremada violencia. Esto ha motivado que se le diera a este acontecimiento el nombre de "Gran explosión". Las energías liberadas por una explosión de proporciones cósmicas llevarían presumiblemente aparejada la generación de una gran cantidad de calor. ¿Existe algún resto de este Universo primitivo que muestre evidencias de esta gran cantidad de calor?

En 1965 dos técnicos de la Bell Telephone Company realizaban experimentos sobre comunicaciones por satélite cuando descubrieron un misterioso ruido de fondo en ondas de radio de longitud de onda muy pequeña, las llamadas microondas. Pronto se hizo evidente que esta perturbación provenía del espacio exterior, y las medidas posteriores revelaron que esta misteriosa radiación tenía un espectro de energía muy parecido al que se obtendría de un cuerpo en equilibrio térmico (es decir, un cuerpo negro) a una temperatura de tres grados por encima del cero absoluto (–270°). Hoy en día la mayor parte de los astrónomos creen que la radiación espacial de fondo en microondas no es más que la propia radiación calorífica primitiva, enfriada extraordinariamente, pero que todavía baña el Universo con su brillo menguante. Una buena evidencia que apoya esta interpretación proviene del hecho de que la radiación tiene la misma intensidad en todas las direcciones del espacio, pudiéndose descartar un origen "local" en nuestra galaxia, ya que tal cosa produciría grandes variaciones direccionales debido a la distribución no uniforme de materia galáctica a nuestro alrededor. Es evidente que la radiación proviene del más remoto espacio extragaláctico. Pero sabemos que no hay allí suficiente cantidad de materia como para

producir una cantidad tan grande de radiación, a no ser que vaya-mos hacia atrás, hasta las condiciones de extrema densidad y compresión que acompañaron a la Gran explosión, antes de que hubiera espacios intergalácticos.

Otra evidencia que abona la teoría de la Gran explosión caliente proviene del examen de los procesos nucleares que pudieron ser provocados por la inmensa cantidad de calor primitivo. Al igual que se puede calcular la compresión en cualquier instante a partir de una progresión matemática, también podemos hacer lo mismo con la temperatura. Para ello es mejor expresar el resultado en términos del tiempo transcurrido desde el inicio de la explosión, es decir, desde el instante de compresión infinita. En ese instante la temperatura también debía probablemente ser infinita. Al cabo de un segundo había descendido hasta diez mil millones de grados y al cabo de unos minutos tan sólo alcanzaba ya un pequeño porcentaje de ese valor. Éstos son los tipos de temperatura que se encuentran en el centro de las estrellas más calientes y en consecuencia es de esperar que tuvieran lugar una gran variedad de reacciones nucleares.

Con anterioridad a un segundo, la temperatura era tan elevada que no podían existir los núcleos atómicos normales. Esto quiere decir que el material cósmico primitivo era una especie de caldo de partículas subatómicas vagando en una mezcla caótica. Los constituyentes básicos eran protones, neutrones, electrones, fotones (calor y luz) y neutrinos. El comportamiento más importante es el de los protones y de los neutrones. Un núcleo, como el del átomo de carbono, consiste en una bola de neutrones y protones unidos por las poderosas fuerzas nucleares. De todas las uniones posibles la más sencilla es la de un neutrón y un protón, formando el núcleo del llamado deuterio, también conocido como hidrógeno pesado (que es químicamente idéntico al hidrógeno, pero dos veces más pesado). Una unión algo más compleja, pero mucho más estable, es la de dos núcleos de deuterio (dos neutrones y dos protones) formando el núcleo del átomo del helio. La lista continúa con el litio y el berilio hasta el carbono (seis neutrones y seis protones) y así sucesivamente hasta el uranio (unos 150 neutrones y 92 protones).

Cuando la temperatura en el Universo primitivo descendió por debajo de unos cuantos miles de millones de grados, se abrió la puerta para la fusión de los protones y los neutrones formando estos núcleos compuestos más pesados y más complejos. Sin embargo, el período disponible para que estas reacciones tuvieran lugar fue limitado debido a tres razones. La primera es que la temperatu-

ra iba cayendo, lo cual supuso que al cabo de poco tiempo era demasiado *baja* para que las reacciones nucleares tuvieran lugar satisfactoriamente. La segunda es que, al expansionarse el Universo, el volumen creciente del espacio debía poblarse con un número fijo de protones y de neutrones. Por lo tanto, la densidad de estas partículas disminuyó rápidamente, con lo cual se hizo menor la probabilidad de interacciones entre ellas. En tercer lugar, los neutrones no son estables indefinidamente fuera de los confines del núcleo. Cuando están aislados, y no actúa sobre ellos la fuerza nuclear, se desintegran al cabo de unos quince minutos.

Los cálculos muestran que durante unos pocos minutos después de los primeros segundos que siguieron a la Gran explosión, alrededor de la sexta parte de los protones existentes y todos los neutrones se unieron formando núcleos de helio, con una pequeña parte que formó deuterio y una fracción aún menor que originó elementos más pesados, como el litio y el carbono. El material primitivo restante estaba formado por los protones que quedaron. Estos protones acabaron formando los núcleos del elemento más simple y ligero: el hidrógeno. En consecuencia, si la teoría de la Gran explosión caliente es correcta, debería haber en el Universo alrededor de un 25 por ciento de helio, algo de deuterio y prácticamente todo el resto de hidrógeno. Evidentemente, esta situación habrá cambiado algo debido a la posterior producción de elementos pesados que se han venido originando desde entonces en el interior de las estrellas (véase capítulo 5). Pero a grandes rasgos cabría esperar un Universo que contenga básicamente hidrógeno y helio en proporción de 4:1. Lo extraordinario es que una teoría tan parca en supuestos origine una predicción tan sorprendentemente ajustada.

Si aceptamos que el modelo de la Gran explosión caliente es una buena aproximación al Cosmos primitivo real, nuestra atención queda irremisiblemente atraída hacia el primer instante en que el Universo explotó. Llegado este punto es importante recordar, tal como dijimos en el capítulo anterior, que la Gran explosión no fue la explosión de un trozo de materia en el interior de un vacío preexistente, sino la súbita aparición explosiva del espacio y la materia a partir de la nada. Esta idea es tan contraria al sentido común que debemos explorar en primer lugar su significado real. Como ya explicamos en el capítulo 7, el Universo en explosión no implica la dispersión de las galaxias a partir de un centro común de explosión, sino la inflación del propio espacio. Podríamos imaginar gráficamente como si de manera continua se estuvieran produciendo pe-

queños glóbulos de espacio que se abrieran paso unos entre otros para dejar sitio a los que van a seguir. Cuanto más nos acercamos a la época de la Gran explosión más intenso es el ritmo de creación de estos glóbulos. Y de la misma forma que nuestros antepasados imaginaban que la raza humana provenía de un solo hombre, podemos imaginar que todo el Universo procede de un glóbulo de espacio infinitamente pequeño.

Antes de seguir adelante es necesario eliminar otro concepto erróneo. Dijimos en el capítulo anterior que el espacio podría tener una extensión infinita o bien estar curvado sobre sí mismo en una "esfera" de más dimensiones finita pero ilimitada. En este caso podríamos suponer que todo el Universo empezó estando comprimido en un punto. Por otro lado, si el espacio es infinito aparece el delicado problema matemático del conflicto entre infinitos, ya que un espacio de extensión está infinitamente comprimido al inicio de la Gran explosión. Esto quiere decir que dado un volumen *finito* cualquiera del Universo actual, por muy grande que sea, estuvo comprimido en un solo punto al principio. No obstante, no sería exacto decir entonces que *todo* el Universo estaba entonces en un solo punto, ya que no es posible que un espacio con la topología de un punto pueda tomar la topología de un espacio de extensión infinita. Por este motivo hemos utilizado la expresión "Universo observable" en lugar de "todo el Universo" en las discusiones anteriores.

Si tomamos en serio el anterior modelo de la Gran explosión, y llevamos la progresión matemática hasta la densidad infinita y volumen cero, no podemos ir más allá de este punto. Cuando en física llegamos al infinito, la teoría queda en suspenso. Literalmente, el espacio ha desaparecido y también lo ha hecho la materia. Lo que haya más allá no tiene lugares ni cosas en el sentido normal de entidades materiales.

Parece que una vez más nos encontramos al borde mismo de la existencia, en una singularidad parecida al punto final de una estrella en colapso, pero esta vez en nuestro pasado. Ésta es la característica que diferencia a la singularidad de la Gran explosión de la correspondiente a un agujero negro, la primera está desnuda. Pero hay una diferencia importante entre la desnudez de la singularidad de la Gran explosión y la del hipotético objeto que mostrábamos en la figura 36(ii) y que explicamos en el texto adjunto.

Dado que el espacio-tiempo no puede seguir a partir de una singularidad, ésta puede ser considerada, como ya dijimos, como una especie de borde o límite del espacio-tiempo. Si dibujamos un diagrama de espacio-tiempo, con el tiempo que transcurre verticalmente y el espacio representado horizontalmente como siempre, se puede considerar a la singularidad como el borde del diagrama. Por así decirlo, hemos cortado la tela del espacio-tiempo dejando un borde abierto. El corte se puede hacer en horizontal o en vertical (o según una combinación de los dos, en ángulo) en el diagrama. Las propiedades de la singularidad dependen fundamentalmente de si es uno u otro el caso.

Un corte vertical se denomina singularidad temporal ya que va según la línea del tiempo creciente, mientras que un corte horizontal se denomina singularidad espacial. El primero constituye un límite del espacio, mientras que el segundo es un límite del tiempo. Si el corte horizontal está en la parte superior del diagrama es un límite al futuro; si está en la parte inferior, limita el pasado. La singularidad de la Gran explosión es un límite en el pasado, es decir, una singularidad espacial que lleva implícito un borde temporal pasado a la existencia.

El significado de la diferencia entre singularidades desnudas temporales y espaciales está en que este último tipo, como en la Gran explosión, no perdura con el tiempo. En cierto sentido es intantánea. Cualesquiera que sean los insondables y extravagantes productos de una singularidad desnuda espacial, los emite todos de golpe. En cambio, una singularidad desnuda temporal perdura en el tiempo y puede seguir plagando el Universo de nuevas influencias.

Estas diferencias son básicas cuando consideramos el tema de causa y efecto y los conceptos de predictibilidad y de las leyes del mundo físico. En el capítulo anterior explicamos cómo la presencia de una singularidad desnuda destruye la ciencia al permitir que ocurran cosas sin una causa que esté acorde con las leyes, en realidad en las proximidades de una singularidad desnuda puede ocurrir cualquier cosa. Esto sigue siendo cierto en el caso de la Gran explosión (el *Big bang*), pero en cierto sentido el problema no es tan serio: el caos solamente existe en el instante de la Gran explosión, muy al principio de la misma, en el primer segundo. Después la ley y el orden toman el control y el Universo se comporta según principios bien establecidos y estrictos.

La existencia de un borde temporal en el pasado implica que, en un sentido básico, la Gran explosión representa la creación del mundo físico. No es solamente la creación de la materia, como se estimó tantas veces en el pasado, sino la creación de todo lo que tiene importancia física, incluyendo el espacio y el tiempo. En la ima-

gen religiosa tradicional, se consideraba que el espacio y el tiempo eran absolutos, independientes de las características de la materia y que habían existido siempre. Ahora vemos que es posible que el tiempo no se extienda indefinidamente en el pasado o en el futuro. La Gran explosión fue el comienzo del tiempo. Si habrá o no un final del tiempo para todo el Universo constituye todavía una cuestión abierta.

Podemos considerar que la creación es un caso especial de singularidad desnuda. Cualquier cosa puede salir de una singularidad desnuda, en el caso de la Gran explosión salió el Universo. Su creación representa la suspensión momentánea de las leyes físicas, un repentino y brutal instante de caos que permitió que algo apareciera a partir de la nada. Es un verdadero milagro –que trasciende los principios físicos– que solamente podría volver a ocurrir en presencia de otra singularidad desnuda.

La existencia de una singularidad desnuda, y por lo tanto de una creación, al comienzo de la Gran explosión se basa en un modelo muy simplificado del Universo que proporciona una progresión matemática, dado el tamaño de un volumen de espacio –por ejemplo, el Universo observable actualmente– en un instante dado. Es necesario que reflexionemos ahora sobre algunas de las simplificaciones que hemos introducido, en particular sobre el significado exacto de la palabra "tamaño". Como ya hemos dicho, las galaxias están distribuidas con gran uniformidad por todo el espacio. Además la velocidad de expansión del Universo es la misma en todas las direcciones. Esta regularidad implica que dada una forma geométrica –por ejemplo, una esfera de galaxias– seguirá siendo una esfera durante la expansión. No se distorsionará en forma de un cigarro o de una torta tal como lo haría si la expansión fuera más rápida en unas direcciones que en otras. Por lo tanto, al hablar de "tamaño" nos referiremos al volumen de una esfera de materia sin preocuparnos por la "forma". Solamente cambia el tamaño, la forma se mantiene igual.

Si bien la suposición de que la forma de un volumen de espacio dado no cambia con el tiempo constituye una buena aproximación, es solamente esto, una aproximación. Existen desde luego irregularidades locales en la organización de la materia cósmica, y las mismas galaxias lo ponen de manifiesto con un cierto grado de no uniformidad y agrupamiento. Al igual que el colapso de una estrella perfectamente esférica formando una singularidad en el interior de un agujero negro constituye una idealización, también lo es suponer

que de una singularidad en la Gran explosión emerge un Universo perfectamente uniforme.

Como ya señalamos en el capítulo 4, se creyó durante un tiempo que las desviaciones de la simetría perfecta podían evitar la formación de una singularidad, pero los teoremas de Hawking-Penrose demostraron que no era así. Incluso si la mayor parte de la masa no llega a ella, se formará algún tipo de singularidad siempre que la gravedad siga siendo atractiva y que exista una superficie atrapada en algún lugar del espacio-tiempo. Igualmente, no se puede evitar la singularidad de la Gran explosión recurriendo a las desviaciones de la simetría perfecta. Sin embargo, podría suceder que la naturaleza de la singularidad fuera mucho más complicada que en el caso idealizado. En lugar de una aparición ordenada del Universo observable a partir de un simple punto, podría ser que hubiera salido de una región extraordinariamente distorsionada, retorcida y extensa de densidad infinita.

Consideremos, por ejemplo, un volumen esférico de espacio que abarque todo el Universo actualmente observable. La disposición de las galaxias en el interior de tal esfera no será exactamente uniforme. Se podría esperar indudablemente una expansión ligeramente más rápida en alguna dirección en particular, si bien la observación nos dice que en la actualidad las diferencias son minúsculas. Sin embargo, a medida que vamos hacia atrás en la evolución cósmica, hacia la creación, es muy probable que estas diferencias fueran aumentando progresivamente hasta que, cerca del comienzo, nuestro volumen esférico estuviera estirado en forma de cigarro o quizá aplastado en forma de torta, o quizá en formas todavía más complejas. Podría haber sido entonces posible que el Universo tuviera una densidad infinita sin necesidad de que toda la materia estuviese en el mismo sitio. Tal como explicamos en el capítulo 6, basta con que esté comprimido en forma de torta infinitamente delgada o extendiéndose en una línea infinitamente fina.

Una posible y complicada singularidad de la Gran explosión es la dibujada de forma esquemática en la figura 52. Además de tener una "forma" complicada (en el espacio) también está "arrugada" en el tiempo, con picos que sobresalen hacia el futuro lejano del Universo. La singularidad es en parte temporal y en parte espacial. Un observador en el suceso P podría examinar muy de cerca un fragmento de la creación, e incluso viajar *por* ella (por la línea de universo dibujada). En este caso, la singularidad de la Gran explosión no es instantánea y podríamos imaginar multitud de "pequeñas ex-

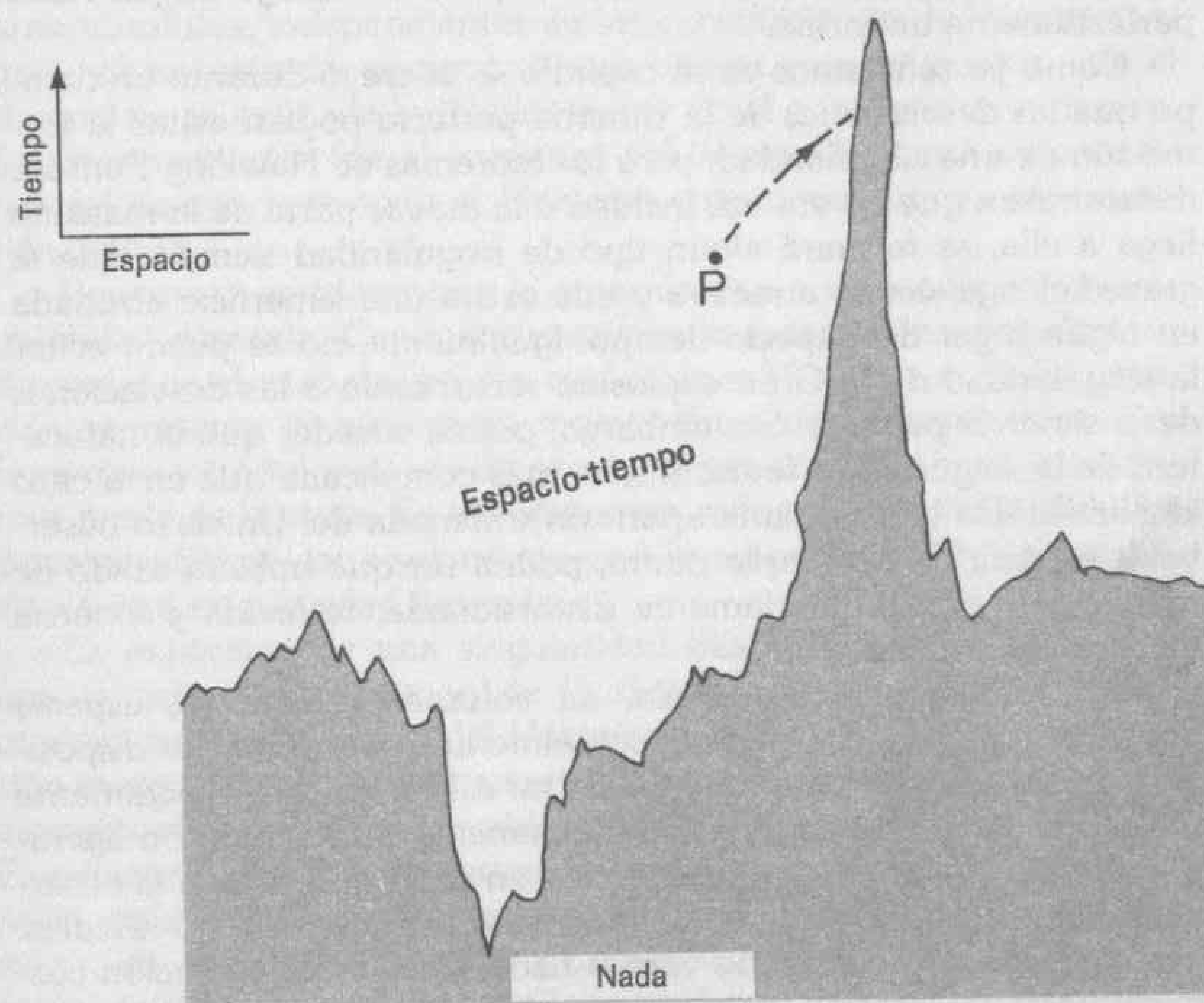


Fig. 52. *Gran explosión y pequeñas explosiones.* La creación del Universo pudo haber sido una singularidad desnuda compleja que debe ser considerada como un limite pasado o borde del tiempo. Los picos constituyen una especie de sucesos creativos retardados: pequeñas explosiones. Se muestra un suceso P que está en el futuro de la Gran explosión, pero también en el pasado de una pequeña explosión, de manera que un observador podria viajar desde P (linea quebrada) hasta el borde ("hasta la creación").

plosiones" que estuvieran sucediendo incluso en la actualidad, representando los picos de la línea quebrada de la figura 52. En realidad ha habido intentos de identificar estos sucesos de creación retardada con los fenómenos explosivos observados en los núcleos de algunas galaxias y quasars. Si bien la singularidad arrugada de la Gran explosión está desnuda y es duradera, no es tan terrible como las singularidades desnudas (discutidas en el capítulo anterior) que se pueden formar a voluntad mediante la apropiada manipulación del colapso de la materia ordinaria.

Es indudable que, en el Universo real, la singularidad de la Gran explosión constituye un tema tremendamente complicado y confuso. La cuestión estriba en si su complicada forma dejó "agujeros" a través de los cuales el espacio-tiempo podría continuar sin llegar a un borde. ¿No sería posible que, si bien existió algún tipo de singularidad en el pasado, no creara la *totalidad* el espacio-tiempo, sino solamente una parte? ¿Creó solamente una parte de la materia o no la creó en absoluto? ¿Ha existido siempre el Universo, de una u otra forma, de tal manera que la Gran explosión representa solamente un intermedio extraordinariamente violento en una historia cósmica sin singularidades?

Algunos cosmólogos han desarrollado complicados modelos matemáticos del Universo para averiguar si una singularidad como la de la Gran explosión podría dejar lugar a un Universo de edad infinita. Si bien estos modelos contienen un alto grado de idealización, permiten no obstante desviaciones de la uniformidad perfecta como las que a buen seguro existen en realidad. La conclusión de estos trabajos es que es perfectamente posible tener Universos infinitamente viejos en los cuales la Gran explosión no es más que una fase transitoria que lleva aparejada un tipo de singularidad bastante débil y de poco efecto.

Nadie tiene la menor idea de si los modelos de un Cosmos infinitamente viejo o aquellos que conllevan una singularidad que corta al espacio-tiempo en una creación universal se acercan más a la realidad. Sin embargo, hay algunas evidencias bastante generales en contra de un Universo infinitamente viejo. Estas evidencias tienen que ver con los agujeros negros.

En el capítulo 3 explicamos cómo, una vez desaparecida la materia en el interior de un agujero negro, no puede volver a salir. Esto implica que la formación de un agujero negro es un proceso irreversible que, dejando de lado por el momento el efecto de evaporación de Hawking, implica que el número y el tamaño de los agujeros negros van aumentando con el tiempo. Si el Universo fuera infinitamente viejo, deberíamos esperar que, en términos generales, casi toda la materia del Universo hubiera desaparecido en el interior de los agujeros negros, y que el Universo sería completamente diferente de lo que observamos en la actualidad.

Desgraciadamente una conclusión tan sencilla se ve complicada por un cierto número de consideraciones. Si el Universo que se expansionó a partir de la Gran explosión hubiera existido antes de ésta, hubo de contraerse antes de esta época. No puede haber per-

manecido estático y después explotar, ya que no hubiera habido forma en la que el material pudiera evitar su caída debido a la gravedad. Si el Universo se estuvo contrayendo antes de la Gran explosión, entonces, a medida que vamos hacia el pasado infinito, el material cósmico debió de estar infinitamente disperso. La pregunta es entonces si se agrupó formando galaxias o unidades menores, o bien si se dispersó uniformemente, tal vez en átomos individuales. En el primer caso es difícil imaginar cómo, con el tiempo infinito disponible, pudo el material en cada unidad evitar la caída formando agujeros negros que, después de un inmenso período de tiempo, se habrían evaporado dejando un Universo compuesto fundamentalmente por radiación, con muy poca materia. Es posible compatibilizar una fase anterior a la Gran explosión dominada por este tipo de radiación con el Universo observado en la actualidad, postulando la conversión de parte de esta radiación en materia durante la gran explosión.

Este supuesto tiene la dificultad adicional de que la nueva materia creada iría acompañada (a menos que sean correctas algunas teorías especulativas recientes sobre las fuerzas subatómicas) por una cantidad igual que la llamada antimateria. No hay ningún problema con la antimateria, excepto que si entra en contacto con la materia ordinaria ambas se aniquilan originando de nuevo radiación. Por lo tanto, es necesario encontrar un mecanismo que separe a la materia de la antimateria, tal vez formando agrupaciones diferentes que comprendan cúmulos enteros de galaxias. Si bien no sabemos si otras galaxias están hechas de materia o de antimateria, se sabe que se produce muy poca mezcla de ambas, ya que de otra forma los rayos gamma que se producirían en su mutua aniquilación serían detectables. Si bien algunos cosmólogos han inventado varias teorías que explican de alguna forma cómo se pueden separar la materia y la antimateria, todavía no se conoce ningún mecanismo convincente. En consecuencia, los intentos de elaborar modelos del Universo siguiendo este camino se pierden bastante en tecnicismos. Desde luego, se podría postular *ad hoc* que la singularidad de la Gran explosión produce la cantidad precisa de materia para obtener la relación observada entre materia y radiación, pero ésta no es una explicación adecuada.

Si el material del Universo en contracción anterior a la Gran explosión empezó estando disperso en átomos individuales, entonces se podía haber evitado el colapso en agujeros negros hasta que la densidad del material creciera tanto como para que las pertubaciones gravitatorias locales tomaran importancia. Esto querría decir que el Universo se contrajo tranquilamente durante un tiempo infinito hasta que, al acercarse la Gran explosión, el material comenzó a agruparse formando galaxias, estrellas y unos cuantos agujeros negros. El Universo alcanzó entonces un estado de máxima compresión, destruyendo todas las estrellas (no los agujeros negros), tras lo cual "rebotó" de alguna forma que no entendemos, y se produjo la Gran explosión. Evidentemente, parte de la materia, y quizá también algunos agujeros negros, tuvieron que evitar la singularidad que sabemos que debió de producirse. Si bien no podemos determinarlo, este escenario conlleva de alguna manera un origen del Universo aún más extraordinario que la súbita y singular creación de todo lo que contiene. ¿Es posible creer que, en el infinito pasado del Universo, los átomos individuales de materia estaban tan espaciados que ni siquiera durante el infinito tiempo disponible no se formaron grandes cuerpos bajo la acción de la gravedad?

En realidad, hay de hecho otro escenario posible de un Universo de edad infinita. Ya hemos dicho que la fuerza de la gravedad que actúa entre las galaxias limita su libre alejamiento, y hace que la velocidad de dispersión disminuya con el tiempo. Si el Universo contiene suficiente cantidad de materia, esta fuerza reductora será lo bastante grande como para detener totalmente la expansión y convertirla en colapso, arrastrando de nuevo a las galaxias las unas hacia las otras en una especie de Gran implosión, el inverso en el tiempo de la Gran explosión. Los teoremas sobre singularidades de Hawking-Penrose predicen que se producirá una singularidad al final del colapso, y la mayoría de los cosmólogos suponen que esto conlleva la aniquilación total del Universo: un futuro final del espacio, del tiempo y de la materia. Podemos representarlo en nuestro diagrama de espacio-tiempo por un corte horizontal en la parte superior. Un Universo que tiene singularidades espaciales en el pasado y en el futuro no tiene más que una duración finita, por ejemplo, de cien mil millones de años. En realidad, el propio tiempo sólo tendría una duración de cien mil millones de años.

Si especulamos sobre la existencia del Universo antes de la Gran explosión, también podríamos suponer que sobrevivirá a la Gran implosión y que rebotará de nuevo en una fase de expansión. A su vez la expansión se detendría y habría una nueva contracción, llevando a otra implosión-explosión y así sucesivamente. Un Cosmos así tiene un comportamiento cíclico, oscilando entre un máximo al final de la expansión y un mínimo en la implosión-explosión. Cada ciclo indivi-

dual tiene una duración finita, pero la historia del Universo es infinita. Las observaciones actuales revelan que la materia luminosa (las estrellas y el gas) constituyen sólo aproximadamente el uno por ciento de la cantidad de materia necesaria para que la expansión cosmológica llegue a invertirse produciendo una implosión. No obstante, es posible que haya inmensas cantidades de masa no observable en forma de agujeros negros, gas intergaláctico, partículas subatómicas que interactúen débilmente u ondas gravitatorias. No podemos desechar de entrada esta idea.

El Universo cíclico también padece el problema de la acumulación de agujeros negros. Durante las épocas de implosión-explosión es difícil imaginar cómo la materia podría evitar la caída formando más y más agujeros negros en cada ciclo. Es difícil que haya habido infinitos ciclos antes del nuestro, ya que probablemente quedaría muy poca materia. Prácticamente todo el Universo estaría hecho de agujeros negros, lo cual es completamente incompatible con las observaciones.

Aparte de todos estos problemas, los físicos se resisten a creer que el Universo existiera antes de la Gran explosión por el simple hecho de que ello implicaría aceptar la peor clase de singularidad desnuda. Dado que los teoremas de Hawking-Penrose predicen una singularidad en la Gran explosión en alguna parte del Universo, el lugar más aceptable para ella es el comienzo del tiempo, donde de alguna forma se acaba instantáneamente. Si no hay un comienzo del tiempo, ello implica o bien que la singularidad siempre está presente, desnuda, o bien que se formará probablemente una nueva singularidad cada vez que colapse el Universo, durando sólo un corto espacio de tiempo y desapareciendo. En este caso podríamos, en principio, construir un modelo del colapso cósmico, con una singularidad desnuda parecida, en un minicolapso localizado. Ésta es la situación misma que, como vimos en el capítulo anterior, los científicos consideran anatema.

Entonces, ¿qué ocurrió antes de la Gran explosión? La respuesta más sencilla es "nada", ya que no había un "antes". Si aceptamos que la singularidad de la Gran explosión es un límite temporal total de Universo físico, entonces el tiempo mismo comenzó a existir en la Gran explosión. No tiene ningún sentido hablar de "antes". De igual forma carece de sentido preguntar qué es lo que originó la Gran explosión, ya que la causalidad conlleva la idea de tiempo; no hubo sucesos anteriores a la singularidad.

La incómoda cuestión de si es posible, o si tiene sentido, que el tiempo tenga un principio o un final ha sido debatida por los filósofos durante más de dos mil años. Aristóteles opinaba que el Universo es infinitamente viejo, pero la tradición judeocristiana, con su dogma central de la creación, entró en conflicto con esta opinión. Más tarde Leibniz especuló con que Dios "o bien no creó nada, o... creó el mundo antes de ningún tiempo, es decir... el mundo es eterno", conclusión que se deriva de la creencia de que "Dios no hace nada sin algún motivo y no hay motivo alguno para que no creara antes el mundo". No obstante, Leibniz se inclinó más bien por el punto de vista contrario sobre la creación, por motivos teológicos.

El filósofo del siglo XVIII Immanuel Kant abordó estos temas en su *Crítica de la razón pura*, publicada en 1781. Considerando la proposición de que el Universo no había tenido un inicio temporal, Kant llegó a la conclusión de que ello implicaría que cualquier instante en el tiempo tendría infinidad de instantes precedentes. Por lo tanto, se habrían producido infinitos estados o condiciones del mundo. Dado que Kant creía que una serie infinita de estados no podía "completarse por síntesis sucesivas" (es decir, que el infinito no puede alcanzarse), dedujo que la idea de un Universo eterno era falsa. Por otro lado, razonaba Kant, si el Universo fue creado hace una determinada cantidad de tiempo, entonces debió de haber un tiempo en que el Universo no existía. Y al argumentar que nada puede originarse a partir de un instante en que nada existe concluía que "el mundo no puede tener un principio". De este modó llegó a una contradicción.

Hoy en día podemos ver la ingenuidad del razonamiento de Kant, ya que la creación del Universo hace una determinada cantidad de tiempo no precisa del supuesto de que hubiera un tiempo en que nada existía. El propio tiempo pudo ser creado, idea que parece que ya anticipó San Agustín cuando escribió "el mundo fue hecho con el tiempo y no en el tiempo".

Parece que para Kant y otros fue un problema la ambigua condición lógica del concepto de un instante inicial. Si el Universo no es infinitamente viejo, parece que debe haber habido un instante inicial del tiempo. Los filósofos modernos mantienen firmemente que un primer suceso no puede ser de la misma clase que los posteriores. Pero muchos olvidan el hecho de que una creación ocurrida hace quince mil millones de años no implica necesariamente un primer suceso. Esta afirmación aparentemente paradójica puede ser verificada recordando algunas de las extrañas propiedades de los conjuntos infinitos que discutimos en el capítulo 2. Si el Universo se ori-

ginó en una singularidad, entonces no podemos considerar que la propia singularidad permanezca en el espacio-tiempo; representa, como hemos discutido extensamente en los capítulos anteriores, el hundimiento del mismo concepto de espacio-tiempo. Si la singularidad no forma parte del espacio-tiempo no es un suceso, y no "sucedió" en un "instante". Pero si la singularidad no es el primer suceso, ¿cuál fue el primer instante *después* de la singularidad?

Esto es lo mismo que preguntar cuál es el menor número mayor que cero: ¿una millonésima, una billonésima? Evidentemente, por muy pequeño que sea el número que elijamos, podemos dividirlo por dos. No existe un número menor que todos los demás. Igualmente, no hay un instante inicial, incluso teniendo en cuenta que el pasado es finito. Esta posibilidad, apuntada en la obra de Tom Stoppard *Jumpers,* alivia muchos de los problemas filosóficos que conlleva la aceptación de la finitud del pasado.

En la imagen religiosa tradicional de la creación, Dios es el responsable de la creación del orden cósmico extraordinariamente elaborado que observamos a nuestro alrededor. Vivimos en un Cosmos tan organizado, repleto de estructura y actividad tan interesantes, que mucha gente encuentra imposible creer que se ha originado por suerte a partir de una disposición aleatoria. La organización más elaborada la constituyen el cuerpo y la mente humanos, pero miremos donde miremos la naturaleza se nos muestra tan organizada que es muy fácil creer que todo el Universo es el fruto de una manipulación inteligente.

El identificar a Dios con la fuerza organizativa no es, desde luego, una explicación, sino una definición. Hoy en día la mayoría de los teólogos pueden aceptar que el Universo se desenvuelve sin necesidad de la continuada supervisión de la divinidad. En su lugar, las leyes de la naturaleza son capaces de regular todas las actividades naturales sin necesidad de intervención sobrenatural. No obstante, se recurre de nuevo a Dios para poner al sistema en movimiento al comienzo. En lenguaje científico Dios manifiesta sus poderes a través de la singularidad desnuda que marca el inicio de la Gran explosión.

En realidad no hay incompatibilidad alguna entre estas ideas teológicas y la versión científica, ya que la singularidad, por definición, trasciende las leyes de la naturaleza. Es el lugar del Universo donde tiene cabida, incluso para los materialistas más empedernidos, admitir la idea de Dios. Pero desde luego, un Dios que está más allá del borde mismo del espacio-tiempo es una triste sombra de la

divinidad que desearía la mayoría. En estos temas fascinantes donde la ciencia se entremezcla con la religión y la filosofía es necesario llevar a la ciencia hasta sus últimos límites. ¿Puede nuestro conocimiento acerca de las singularidades, aunque limitado, revelarnos algo sobre la naturaleza del Dios que creó el Universo, utilizando un lenguage técnico? ¿Son las propiedades de las singularidades desnudas compatibles con la idea de un Dios que inició toda actividad creando la estructura altamente organizada que llamamos Universo, dejándolo desenvolverse luego por sí mismo de acuerdo con las leyes de la naturaleza?

En el capítulo anterior explicamos cómo las singularidades podrían ser de un tipo caótico o bien organizativo. Evidentemente, podemos imaginar una singularidad desnuda que emite sistemas ya confeccionados altamente organizados. En realidad, podríamos pensar en una singularidad desnuda que simplemente emite planetas y estrellas enteras con sus habitantes incluidos. Especulaciones tan absurdas son solamente la expresión del hecho de que las leyes de la naturaleza quedan en suspenso en la singularidad. La imagen más creíble es la de la singularidad caótica, donde la suspensión de la ley lleva a la aleatoriedad total, de manera que el material y las influencias que aparecen no tienen ninguna organización en absoluto. Cualquier estructura que aparezca es puramente accidental y extraordinariamente improbable.

¿Que evidencia nos ofrecen nuestras observaciones del Universo primitivo de que la singularidad de la Gran explosión fuera responsable de la creación del alto grado de orden que observamos actualmente en el Universo? Cuando se examinan las condiciones físicas en la Gran explosión parece que la organización cósmica observada en la actualidad no existía en absoluto al principio. No había galaxias, ni estrellas, ni planetas, ni gente, ni átomos, ni siquiera núcleos atómicos. Cualquier intento de explicar el Universo, tan elaboradamente organizado y de un funcionamiento tan maravilloso, que habitamos actualmente, debe basarse en el examen de lo que ha ocurrido *después* de la Gran explosión. El Universo primitivo estaba prácticamente, por lo que sabemos, en el caos total.

La mejor evidencia de un principio extremadamente caótico y desordenado está en las observaciones del fondo de radiación cósmica en microondas que mencionamos con anterioridad en este capítulo, como reliquia del calor primitivo. Como ya señalamos, el espectro de energía de esta radiación es prácticamente igual que el que emitiría un cuerpo que hubiera alcanzado el equilibrio térmico

(conocido como espectro del cuerpo negro). A finales del siglo pasado los físicos comenzaron a investigar el significado del equilibrio térmico a la luz de la teoría atómica de la materia. Descubrieron que el estado de equilibrio corresponde al estado de mayor desorden atómico, que se produce cuando los átomos que constituyen un cuerpo están dispuestos de la forma más aleatoria posible. Los restos del calor primitivo que todavía bañan el Universo llevan consigo la inconfundible impronta del caos atómico en la forma de su espectro de energía. Según esto el Universo se inició con el desorden atómico total. La forma en la cual ha surgido el orden cósmico a partir del caos primitivo puede entenderse en detalle examinando los procesos nucleares que se produjeron en los primeros minutos tras el inicio de la Gran explosión. Aparentemente no hay necesidad de un organizador sobrenatural –las propias leyes de la naturaleza son capaces de generar el actual grado de estructura y organización que hace que el Universo sea tan interesante–. Estos temas están tratados en detalle en mi libro *El Universo desbocado*.

Todas estas consideraciones nos llevan a creer que, al menos en el caso de la singularidad de la Gran explosión, las influencias que aparecieron fueron totalmente desordenadas y caóticas. Es posible que esta conclusión se modifique a la luz de futuros desarrollos en astronomía y física fundamental, pero hay que admitir que, en el actual estado de comprensión de las cosas, la ciencia no apoya la imagen religiosa de un creador que dio origen a una organización cósmica preestablecida. La vieja idea de una especie de "Universo global" establecido con esplendor cósmico no está de acuerdo con las evidencias que poseemos. La organización ha ido apareciendo lenta y automáticamente a partir de un comienzo violento.

Esta conclusión completa la sistemática retirada que ha experimentado el concepto de una divinidad organizadora y ejecutora, concepto que surgió hace unos dos o tres mil años. Nuestros antepasados, que invocaban acciones sobrenaturales siempre que sucedía algo inexplicable, aprendieron progresivamente a reemplazar las interferencias sobrenaturales *ad hoc* por las disciplinadas leyes de la naturaleza. El modelo del mundo sufrió una lenta metamorfosis desde el simple juguete de unos dioses caprichosos hasta un sistema ordenado y acorde con las leyes, casi una especie de aparato mecánico. El dominio de lo sobrenatural fue erosionándose gradualmente a medida que los fenómenos iban siendo explicados a base de principios científicos. En el siglo pasado las únicas "áreas de operación" legítimas de la divinidad eran la creación del hombre y la creación del Universo. Hoy en día sabemos cómo apareció el hombre sobre la Tierra e incluso (en líneas generales) cómo lo hizo la vida. Ahora estamos empezando a comprender la creación del propio Universo, incluyendo la creación del espacio y del tiempo. El Dios organizador y ejecutor ha sido dejado atrás en el tiempo, incluso fuera del límite del tiempo, relegado a un campo más allá del mundo natural. Y además vemos que en el lugar donde se encuentran el mundo natural y el sobrenatural –la singularidad– tampoco se necesita un Dios organizador. El Cosmos ordenado que conocemos ha surgido automáticamente del caos primitivo.

Es realmente notable que la gente religiosa no haya aprendido la lección histórica de que la naturaleza puede ordenar sus propios asuntos. El gran error de la teología consiste en aferrarse a una creencia prehistórica en una divinidad organizadora y ejecutora. Parece que desde el principio ignoran que el verdadero esplendor del Cosmos no está en el comienzo de la organización, sino en las leyes de la naturaleza que nutren y mantienen esta organización, haciendo que el sistema cósmico funcione de manera ordenada. ¿Dónde está la excelencia de un Dios que está más allá del borde del infinito y que no forma parte de la belleza impresionante contenida en las leyes matemáticas de la naturaleza? Si nos concentramos en la causalidad no encontraremos ningún fin a la creación, ya que sabemos que causa y efecto son temas complicados y delicados cuando tenemos en cuenta la estructura del espacio-tiempo. Sólo un Dios que trascienda al espacio-tiempo, que esté por encima de la causalidad y la pura ejecución de actos, puede tener alguna relevancia para la actividad natural que resplandece a nuestro alrededor.

9. Más allá del infinito

La ciencia actúa como una prolongación de nuestros sentidos. Nos permite explorar regiones del espacio y del tiempo que son y continuarán siéndonos físicamente inaccesibles. Combinando el uso de las matemáticas con experimentos locales, los físicos y los astrónomos pueden ir descifrando los secretos del Universo, explorando con su imaginación las poderosas fuerzas que se esconden en lo más profundo de los quasars, el comportamiento de la materia neutrónica ultracomprimida o la misteriosa curvatura espacial en el interior de los agujeros negros. Igualmente pueden dirigir su atención hacia el mundo interior de los átomos, desvelando un Universo entero de microcosmos, poblado de exóticas y efímeras partículas-ondas de las más variadas especies, algunas de las cuales tienen una vida de una duración increíblemente pequeña.

El dominio de las actuales investigaciones científicas abarca una serie enormemente extensa de magnitudes. Los experimentos con aceleradores subatómicos permiten a los físicos comprobar las leyes de la naturaleza y examinar la estructura de la materia en longitudes de hasta una diezmilbillonésima (10^{-14}) de centímetro y duraciones de hasta una milbillonésima de billonésima (10^{-27}) de segundo. En el otro extremo la moderna astronomía puede alcanzar los límites más alejados del Cosmos, a muchos miles de millones de años luz. Hay otras cantidades que también abarcan un extenso rango. Se conoce tanto el comportamiento del electrón, cuya masa es de una milbillonésima de billonésima (10^{-27}) de gramo, como el del sistema solar con sus mil billones de billones de toneladas de materia (10^{27}).

Año tras año, los nuevos desarrollos tecnológicos y los avances en la comprensión teórica extienden y consolidan el orden de los fe-

nómenos naturales a nuestro alcance. Algunos científicos y filósofos creen que llegaremos a entender perfectamente todos los sistemas físicos y que la ciencia se acabará entonces. El inmenso cuerpo de conocimiento humano abarcaría entonces a toda la creación. Otros afirman que nunca llegaremos a encontrar, y no digamos a entender todas sus aplicaciones, todas las leyes de la naturaleza, por mucho que lo intentemos. Pero hay unos cuantos físicos que afirman que con la llegada de las singularidades del espacio-tiempo hemos encontrado lo que será siempre, sea como sea, desconocido, un apéndice de la realidad que, por definición, estará siempre más allá del alcance de cualquier investigación intelectual.

¿Es posible creer que los principios racionales quedan en suspenso en una singularidad? ¿Representa ésta un límite entre lo natural y lo sobrenatural -aquello que podemos llegar a conocer y lo que nunca conoceremos- o simplemente entre lo conocido y lo desconocido? No hay un acuerdo unánime entre los científicos acerca de estas preguntas tan fundamentales. Podría ser que la singularidad representara el final del camino para la ciencia, o significa simplemente el fin de las leyes de la naturaleza que conocemos en la actualidad, a la espera de que entren en escena nuevas leyes todavía por descubrir. Si bien, por el tiempo en que escribimos estas líneas, todavía no tenemos respuesta para estas preguntas apremiantes, existen al menos precedentes históricos.

El físico John Wheeler en el libro *Gravitation* (Freeman, 1973, del que son coautores C. W. Misner y K. S. Thorne) y bajo el subtítulo de "Más allá del final del tiempo: el colapso gravitatorio, la mayor crisis en la física de todos los tiempos", traza un paralelismo entre la crisis del colapso gravitatorio y la vieja crisis que afectó a la teoría del átomo, el cual también estuvo amenazado por el colapso catastrófico. Al final del capítulo 2 tratamos brevemente este tema y señalamos que la llamada teoría cuántica de la materia, según la cual una partícula atómica como el electrón se mueve según principios ondulatorios más que como partícula, solucionó la crisis. La física sobrevivió al colapso del átomo. ¿Podrá sobrevivir también al colapso de las estrellas?

Wheeler cree que sí. En su opinión, el colapso gravitatorio es una paradoja, ya que por un lado la teoría de la gravedad de Einstein insiste en que el espacio-tiempo debe tener un final y que en la física todo debe detenerse, mientras que por otro la física dice que "no existe un final" ya que "por definición la física es lo que permanece eternamente a pesar de todos los oscuros cambios que se producen en la apariencia superficial de la realidad". Wheeler pone el acento sobre el paralelismo entre la crisis atómica de 1911 y el actual enigma del colapso gravitatorio. En el capítulo 2 explicamos cómo un electrón que se deja en libertad cerca de un protón parece a primera vista sentenciado, ya que tras un corto intervalo de tiempo caerá sobre el protón y bañará al entorno con una cantidad infinita de energía radiante al desaparecer totalmente. Esto se asemeja a la infinita compacidad que alcanza una estrella en colapso en un tiempo finito, cuando ya no puede resistir su propio peso.

Cuando la física afronta una crisis de este tipo hay dos caminos. Uno consiste en negar que la teoría predice una crisis y buscar una teoría modificada que se asemeje a la ya existente en todo lo relacionado con los experimentos ya realizados. Este tipo de arreglo a base de remiendos se conoce como "pequeña solución". La alternativa, "la gran solución", consiste en aferrarse al espíritu de la teoría original, introduciendo un nuevo principio fundamental que no altere la teoría pero vaya más allá.

La crisis atómica de 1911 fue un reto de este tipo para la ciencia. La teoría ya existente de James Clerk Maxwell, que describe tan extraordinariamente bien el comportamiento eléctrico y magnético de la materia, predecía categóricamente que los electrones que describían órbitas en los átomos, caerían en espiral sobre el núcleo produciendo el colapso del átomo. El motivo de este comportamiento suicida reside en la sistemática tendencia que tiene un electrón acelerado a radiar ondas electromagnéticas. Se propusieron varias soluciones "baratas" para salvar a la física. Por ejemplo, si se modificaba de algún modo la sencilla y fundamental ley del inverso del cuadrado de la distancia de la atracción eléctrica entre el protón y el electrón para distancias muy pequeñas, se podía evitar el colapso.

¿Cómo podemos estar seguros de que la teoría de Maxwell de las fuerzas electromagnéticas sigue siendo válida para distancias arbitrariamente pequeñas? En 1911 los experimentos únicamente habían llegado a comprobar la teoría de Maxwell para distancias desde unos pocos milímetros hasta una longitud de unos cuantos kilómetros. ¿Era razonable suponer que la teoría del electromagnetismo que se aplicaba a los fenómenos cotidianos como la transmisión por radio, seguiría siendo válida en un microcosmos, para distancias del orden de unas milmillonésimas de centímetro? Al plantearse cuestiones de este tipo, los físicos solamente pueden juzgar amparándose en criterios no científicos. Todos están de acuerdo en que la teoría de Maxwell constituye una descripción muy elegante y

concisa, tanto matemática como físicamente, de las fuerzas electromagnéticas, y algunos opinan que es la obra intelectual más perfecta del siglo XIX. Todo aquel que ha estudiado la electrodinámica de Maxwell no ha podido escapar a la impresión que produce la simetría interna de su matemática y la disposición tan compacta de la relación entre los efectos eléctricos y magnéticos. Una teoría tan simple y satisfactoria sobre la naturaleza tiene un atractivo que está muy por encima de los estrictos criterios que los científicos utilizan en el laboratorio para comprobar sus teorías. Estas razones estéticas y físicas son las que justifican el aprecio hacia la electrodinámica de Maxwell. Querer parchearla en un burdo intento de evitar el colapso atómico es casi una blasfemia. Es como si entráramos en el Taj Mahal y descubriéramos que su base es de hormigón armado. Al final, la teoría de Maxwell no sólo sobrevivió a la crisis atómica, sino que hoy en día ya ha sido comprobada para distancias que van desde una cienmillonésima del tamaño de un átomo hasta las dimensiones de una galaxia.

Otra manera fácil de escapar de la crisis atómica consistía en negar que un electrón en órbita alrededor de un núcleo atómico emitiera radiación electromagnética, incluso cuando la experiencia en el laboratorio ha demostrado que los sistemas eléctricos de dimensiones "cotidianas" radian ondas electromagnéticas. Este intento entra en conflicto con la teoría especial de la relatividad de Einstein, que en 1911 era todavía relativamente nueva. El problema es que cuando un electrón se desplaza desde una parte a otra del átomo, lleva consigo su campo eléctrico. Este campo puede ser detectado (al menos en principio) lejos del electrón. Si el campo se reajustara automáticamente en la nueva posición del electrón cargado, tendríamos a mano un código de señales. Por ejemplo, se podría establecer un código sencillo estableciendo que cuando el electrón se para en su trayectoria orbital, el cese abrupto en el movimiento de su campo eléctrico registrado a una cierta distancia significaría "sí". Si el electrón no se para, significa "no".

El conflicto con la teoría de la relatividad está en que la transmisión de información (incluso en sistemas tan limitados) no puede ser de ninguna manera más rápida que la velocidad de la luz. Por lo tanto, el campo eléctrico de un electrón no puede reajustarse instantáneamente a cualquier distancia del electrón. El campo próximo se puede ajustar rápidamente, pero las regiones más lejanas del campo deben esperar al menos un tiempo igual al que tarda la luz en llegar desde el electrón para cambiar. Los extremos del campo

se resisten a cambiar y se quedan rezagados en el campo que se halla en las cercanías del electrón. Cuando el electrón cambia súbitamente su movimiento, como cuando realiza órbitas alrededor del núcleo atómico, el campo eléctrico a distancia del electrón tarda en cambiar. Dado que el campo próximo cambia más rápidamente que el campo lejano, la forma del campo se distorsiona debido al movimiento acelerado del electrón. Esta distorsión viaja alejándose del electrón a la velocidad de la luz a medida que las regiones más distantes se van "acoplando" a los cambios en el campo próximo al electrón. Pero esta onda viajera lleva energía y momento y es precisamente lo que denominamos radiación electromagnética. La imposibilidad de la transmisión instantánea conduce inevitablemente al flujo de energía radiante a partir del electrón acelerado. Intentar impedir el colapso atómico negando que el electrón irradia equivale a aceptar la transmisión de señales más rápidas que la luz y con ello las paradojas causales que ello lleva aparejado ya mencionadas en el capítulo 3. Debemos elegir entre abandonar la causalidad (y permitir que las señales viajen hacia el pasado) o encontrar un principio nuevo que vaya más allá de los viejos conceptos.

El caso es que este nuevo principio fue descubierto por Niels Bohr y elaborado en los años 20 por Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg. La llamada teoría cuántica incorporó tanto la estructura de la electrodinámica de Maxwell como los principios de causalidad, pero los incluyó en un sistema conceptual nuevo que no permitía que los átomos colapsaran a un punto en medio de una cantidad infinita de radiación. En su lugar se descubrió el curioso comportamiento ondulatorio de la materia subatómica y se vio que esto proporcionaba una especie de cojín de energía que impide que el electrón se acerque demasiado al núcleo atómico. Fue necesario un cambio en la estructura fundamental de la física para solucionar la crisis atómica.

Wheeler considera que la actual controversia sobre el colapso gravitatorio y la aparición de las singularidades del espacio-tiempo no son más que una nueva puesta en escena de estas viejas discusiones referentes al átomo. Son muchos los que consideran que la teoría general de la relatividad de Einstein constituye el supremo logro intelectual de la especie humana; indudablemente supera a la teoría electromagnética de Maxwell en elegancia, economía y extensión. Construye el mundo a partir de simple geometría y lo dispone de acuerdo con leyes matemáticas difícilmente superables en sencillez y potencia. Muy pocos son los científicos que nieguen que su

atractivo estético constituye la evidencia más persuasiva en favor suyo.

Pero la teoría de Einstein conduce irremisiblemente a una singularidad, al colapso gravitatorio ilimitado. A menudo se ha propuesto que esta teoría debería ser abandonada debido a este absurdo. Se argumenta que la relatividad de Einstein solamente ha sido comprobada para distancias que van desde unos metros a unos miles de millones de años luz. ¿Cómo podemos estar seguros de que continúa siendo válida en el microcosmos? ¿Sería sorprendente que la teoría no fuera válida en el interior del átomo, por poner un ejemplo? ¿O no será quizás que cuando una estrella se comprime hasta un tamaño de una milmillonésima de centímetro deja de ser válida la ley del inverso del cuadrado de la distancia?

Los argumentos estéticos que se utilizaron para defender la teoría de Maxwell ante el colapso atómico pueden desarrollarse de forma aún más convincente en favor de la teoría de Einstein. Intentar parchear este edificio de tan gran poder descriptivo y predictivo para aliviar la crisis de la singularidad parece fuera de lugar. No fue el camino en 1911 y sería sorprendente si ahora fuera la solución.

También hay un gran paralelismo con los intentos de resolver el problema del colapso atómico abandonando la causalidad. De entrada, la idea parece muy atractiva. En los capítulos anteriores vimos cómo la estrella que ha agotado su combustible no puede acumular la cantidad de presión calorífica necesaria para detener la contracción progresiva. Los núcleos de muchas estrellas se vuelven tan compactos que sus átomos se convierten en neutrones, y terminan sus vidas como estrellas de neutrones con tamaños de tan sólo unos pocos kilómetros de diámetro. Ya dijimos en el capítulo 5 que si una estrella de neutrones contiene algo más de unas cuantas masas solares, entonces ni siquiera la materia neutrónica sería lo suficientemente dura como para resistir el colapso catastrófico.

La experiencia nos dice que cuanto más comprimimos un material más duro resulta. Una estrella de neutrones es mil millones de veces más dura que el acero, y aun así la gravedad la aplasta. ¿Y no podría ser que en realidad, a medida que comprimimos más y más el material durante el colapso, la dureza de los neutrones superaplastados aumentara lo suficiente como para evitar una mayor compresión? Dado que no sabemos nada acerca del comportamiento de la materia en condiciones tan extremas, ¿qué base tenemos para suponer que la gravedad será siempre capaz de superar la rigidez de la materia por muy comprimida que esté ésta?

Es cierto que no es muy probable que lleguemos nunca a comprender totalmente las propiedades de la materia neutrónica, y no digamos de estados aún más densos, pero aun así hay un argumento general y muy poderoso en contra del supuesto de una materia superdura como solución fácil para evitar las singularidades. Las consideraciones en cuestión están relacionadas, sorprendentemente, con el familiar fenómeno del sonido. Los músicos saben muy bien que una cuerda de guitarra dura y tensa ejecuta una nota más alta que una cuerda floja. Físicamente esto se debe a que la frecuencia de vibración de la cuerda es más alta. Si consideramos la vibración como una onda estacionaria, es decir, una onda atrapada entre los extremos fijos de la cuerda, entonces podemos deducir que la mayor frecuencia se debe a la mayor velocidad de propagación de la onda en la cuerda tensa.

Se demuestra muy fácilmente la relación existente entre la dureza y la velocidad de la onda. Un trozo largo de cuerda o de goma al recibir una sacudida en uno de sus extremos enviará la perturbación a lo largo de ella. Cuanto más tensa esté la cuerda, mayor será la velocidad de la onda. Experimentos sencillos con materiales sólidos revelan que las ondas sonoras viajan por ellos a velocidades que dependen de su dureza. Es una propiedad fácil de comprender. Las ondas sonoras no son más que vibraciones del material. Si golpeamos una varilla metálica en uno de sus extremos el material se comprime ligeramente debido al golpe. Al ser elástico el material intenta volver a su densidad natural, y al hacerlo propaga la compresión al material vecino. Éste también trata de volver al equilibrio y transmite la vibración al material contiguo y así sucesivamente. El efecto de la elasticidad del material es que la compresión producida por el golpe se propaga rápidamente por la varilla. En esto consiste el sonido: ondas de compresión parecidas son las que se propagan por el aire hasta nuestros oídos. Si el material es muy duro, las fuerzas elásticas son grandes y se oponen rápida y vigorosamente a la compresión. (Las gomas tensas vibran más rápidamente que las que no lo están tanto.) Por lo tanto, en un material duro las ondas sonoras viajan muy rápidas.

En el caso de la materia neutrónica, sus propiedades elásticas son muy diferentes de las de cualquier otro objeto. Una estrella de neutrones es tan dura que la velocidad del sonido resulta ser una parte considerable de la velocidad de la luz. Es relativamente fácil investigar las propiedades elásticas de un material aún más duro mediante modelos matemáticos, y el resultado supone un duro gol-

pe para las esperanzas de evitar el colapso gravitatorio catastrófico. Resulta que en un material que sea lo suficientemente duro como para aguantar una estrella contraída de varias masas solares, las ondas sonoras se propagaran por su interior a una velocidad mayor que la de la luz. Por así decirlo, un mensaje oral iría más rápido que transmitido por ondas electromagnéticas. La teoría de la relatividad prohíbe estrictamente que esto ocurra; ninguna información puede viajar más rápida que la luz, incluyendo la palabra hablada. Intentar evitar el colapso total imaginando una materia extraordinariamente dura equivale a abandonar la causalidad, de la misma manera que en el caso del colapso atómico suponer que no se emitía radiación violaba la causalidad. Si utilizamos las lecciones de 1911 como guía, éste no es el camino a seguir.

¿Y la teoría cuántica que tuvo tanto éxito en la estabilización del átomo? Desgraciadamente éste es un tema todavía abierto ya que aún no existe una teoría cuántica del campo gravitatorio que sea viable. Como ya explicamos al final del capítulo 2, todas las teorías cuánticas de las fuerzas de la naturaleza tienen problemas con el infinito, y solamente las llamadas teorías renormalizables, en las cuales mediante sencillos trucos matemáticos escondemos a los infinitos debajo de la alfombra, tienen un valor real en lo que respecta a la predicción. La teoría cuántica de la gravedad está plagada de cantidades infinitas que no parecen tener relación alguna con los infinitos de una singularidad del espacio-tiempo. Por lo tanto, no es posible realizar el equivalente a los cálculos atómicos de Niels Bohr para ver si los efectos cuánticos pueden salvar al Universo de la singularidad.

A pesar de esta escasez de cálculos concretos, se ha especulado mucho acerca de los probables efectos de la gravedad cuántica. En un átomo el "cojín" cuántico de energía que impide que el electrón caiga en espiral sobre el núcleo opera de forma efectiva a una distancia de unas cuantas milmillonésimas de centímetro. Pero un electrón es atraído (eléctricamente) hacia el núcleo por una fuerza que es casi infinitesimal bajo el prisma del colapso gravitatorio. Si una estrella se comprime hasta el tamaño de un átomo, la fuerza gravitatoria de atracción del electrón es un millón de billones (10^{-18}) de veces mayor, y los efectos cuánticos son totalmente despreciables. Sólo cuando la estrella se haya contraído hasta un tamaño de un uno seguido de veinticinco ceros de veces más pequeño que el de un átomo empezará a entrar en acción la teoría cuántica. Esto quiere decir que la estrella tiene un diámetro de tan sólo cien milmillonésimas de una billonésima de una billonésima (10^{-33}) de centímetro.

Para longitudes tan increíblemente pequeñas, es posible esperar profundas modificaciones en la estructura del espacio y del tiempo. Se ha propuesto que la perturbación cuántica será tan grande que incluso afectará a la topología del espacio-tiempo. En lugar de una "hoja abollada" tendrá una estructura espumosa, llena de puentes y agujeros. El concepto de un continuo espacial y temporal, mantenido durante siglos, parece estar en peligro cuando se tienen en cuenta los efectos cuánticos. Nadie tiene la más remota idea de lo que le ocurriría a la estrella cuando llegara al nivel de esta esponja espacio-temporal. Entramos aquí en una región de la física para la cual los principios establecidos no constituyen una buena guía. Puede ser que aún se produzca la singularidad. Nadie lo sabe.

Si, como propone Wheeler, tenemos la valentía de seguir aferrados a la teoría de Einstein, y creemos que la física debe continuar a pesar del colapso gravitatorio, entonces no tenemos más remedio que suponer que una física radicalmente nueva debe entrar en acción antes de que se produzca el infinito. Es probable que debamos abandonar totalmente el concepto de espacio y tiempo en este nuevo dominio, de manera que la singularidad ya no será considerada como el final de la existencia sino solamente el final del espacio-tiempo. Wheeler compara la situación con la investigación sobre los medios elásticos. Tanto el espacio-tiempo como los materiales elásticos pueden curvarse y distorsionarse. ¿Cómo podemos saber cómo son las fuerzas elásticas en un material? ¿En particular, cómo podemos predecir el límite elástico, el momento en que se rompe la goma elástica? El estudio de la elasticidad lleva implícita una teoría matemática muy bella y unas predicciones impresionantes que abarcan un amplio abanico de fenómenos. Las propiedades de los sólidos, líquidos y gases elásticos forman parte de la experiencia diaria y cualquier ingeniero está familiarizado con ellas. Pero toda una vida de experimentos de ingeniería no contribuiría en nada a la comprensión del origen y de los límites de la elasticidad. Para descubrir por qué la goma y el acero pueden dilatarse y comprimirse es necesario estudiar los átomos y las moléculas de los cuales están hechos. Tenemos que experimentar en el microcosmos para explicar las fuerzas que mantienen unidas a las moléculas y que constituyen el material incluyendo su elasticidad. El estudio de los medios elásticos no podría nunca explicar los átomos, pero los átomos si pueden explicar la elasticidad de los materiales macroscópicos.

El progreso de la ciencia ha seguido tradicionalmente un camino bien definido que pretende explicar las propiedades macroscópicas de la materia a partir del comportamiento de sus partes más pequeñas. Hoy en día se comprenden la mayor parte de las propiedades macroscópicas a partir del estudio de la materia en escalas cada vez menores. Parece razonable que el mismo camino sea también aplicable al espacio-tiempo: el análisis de unidades cada vez menores debería finalmente poner al descubierto los "átomos" que constituyen el espacio y el tiempo.

A Newton, y por descontado a Leibniz, les hubiera parecido un absurdo hablar de construir el espacio y el tiempo a partir de unidades microscópicas como si fueran materiales sólidos. En este siglo, con la descripción de una especie de distorsión "elástica" del espacio-tiempo proporcionada por la teoría de la relatividad de Einstein, la idea no parece tan ridícula. Pero los conceptos de espacio y tiempo están, sin embargo, tan profundamente enraizados en nuestra cultura que es difícil su abandono. A falta de un experimento factible que nos proporcione una guía, sólo las matemáticas y la estética pueden sugerirnos qué tipo de entidades se esconden en el entramado espacio-tiempo. Se han hecho varios atrevidos intentos de construir las propiedades básicas del espacio y del tiempo a partir de objetos matemáticos abstractos totalmente desconocidos para la física. En último extremo podríamos esperar que incluso propiedades topológicas, tales como la dimensión del espacio y del tiempo (tres y uno, respectivamente), se derivaran de forma natural en un tratamiento como éste. Desgraciadamente aparecen extraordinarios problemas matemáticos y estas teorías pregeométricas están todavía en su infancia.

Cuando la gravedad es tan fuerte que la geometría no puede sobrevivir, el espacio y el tiempo se rompen y se llega al equivalente del límite elástico de un sólido, en el que el material se rompe debido a la tensión. Si existe una subestructura pregeométrica es aquí, en el borde del infinito, donde quedará al descubierto. Si existen realmente singularidades desnudas tenemos la oportunidad de examinar cómo funciona esta subestructura, ya que la singularidad podrá enviar información al espacio que la rodea. Hasta que esto ocurra, solamente podemos especular para responder a las grandes preguntas sobre el destino de las estrellas en colapso, o incluso del mismo Universo.

A medida que una estrella se va contrayendo hacia el final llegará a desgarrar el espacio-tiempo y a entrar en el mundo de la pregeometría. No sabemos lo que puede haber en ese mundo o qué propiedades puede tener. No sabemos ni siquiera de qué está compuesto. Si la física continúa en esta región más allá del espacio-tiempo, entonces parece que la estrella tendría dos alternativas. O bien desaparece para siempre del espacio-tiempo y se une a los habitantes de esta misteriosa subestructura pregeométrica encerrada, por así decirlo, en el interior del espacio-tiempo, o bien encontrará que esta región pregeométrica no es más que una pequeña barrera hacia otra región desconocida, quizás otro espacio-tiempo –un Universo paralelo como los que mencionamos en los capítulos 4 y 6–.

Esto pone sobre el tapete el tema del suceso creativo –la Gran explosión– y lo que pudo haber antes de ella. Si, en cierto sentido, una estrella en colapso puede sobrevivir a éste, bien que en una forma totalmente diferente, debemos aceptar que el Universo existía, de alguna forma, antes de la Gran explosión. ¿Surgió el Universo que hoy conocemos de este misterioso mundo pregeométrico hace quince mil millones de años? Y si así fue, ¿representó la Gran explosión algo más que una fase transitoria entre ciclos sucesivos del Universo? Algunos de los problemas que tiene una teoría como ésta fueron discutidos en el capítulo 8, pero si realmente existe este mundo pregeométrico, entonces podría ser que en él quedaran en suspenso toda clase de leyes físicas.

Lo cierto es que John Wheeler sostuvo que el Universo es un mecanismo cíclico, que va alternando entre una expansión hasta alcanzar un enorme tamaño y un colapso hasta un estado pregeométrico ultradenso y microscópico, del cual sale en una Gran explosión con todos los sistemas físicos "reprocesados". En este Cosmos de "nuevo cuño", cada ciclo de expansión y contracción comienza con partículas subatómicas nuevas, calor nuevo, movimiento nuevo y tal vez incluso leyes de la física nuevas. Es posible que las características del Universo que surge sean determinadas de forma totalmente aleatoria, como si se lanzara un dado cósmico. Podemos imaginar mundos totalmente ajenos a nuestra experiencia en los cuales incluso la naturaleza sea muy diferente. La cuestión de si en estos otros ciclos podría existir alguna clase de vida ha sido objeto de mucho debate. Por lo que sabemos en la actualidad, parece que la vida implica un balance bastante delicado, de manera que cualquier reestructuración importante del mundo físico que hoy conocemos tendría graves consecuencias para la biología.

El viaje hacia la singularidad desnuda ha sido largo e interesante. Por el camino nos hemos encontrado con sistemas raros y exóti-

cos, con conceptos físicos extraños y con nociones matemáticas asombrosas. El viaje se inició con el relato sobre la gravedad y su poder omnipresente. La sencilla ley del inverso del cuadrado de la distancia, que conoce cualquier alumno, resultó ser una amenaza para la materia de una importancia extraordinaria. Comenzamos a ver que el Universo es un campo de batalla entre la gravedad y las otras fuerzas de la naturaleza, con la primera intentando aplastar a la materia hasta hacerla desaparecer y las otras resistiendo, más o menos desesperadamente. El hecho de que estemos vivos para ser testigos de esta lucha testifica que la gravedad debe luchar duramente para conseguir cada víctima, pero al final parece que siempre tiene éxito. La mayor parte del Cosmos está constituido por las estrellas, y éstas pagan muy cara la tregua temporal. Al Sol cada día le cuesta un billón de billones (10^{24}) de dólares en energía el evitar el casi instántaneo colapso hasta la nada. Al final el crédito se agota y la deuda se paga en forma de aniquilación.

Vimos cómo la muerte de una estrella puede resultar muy complicada, con explosiones titánicas y una actividad muy turbulenta en el centro. Si no hay ninguna novedad, el núcleo en colapso se verá rápidamente rodeado por un horizonte de sucesos, y el propio núcleo se contraerá en pocas millonésimas de segundo formando un agujero negro del cual ya no podrá regresar. Seguimos el destino del núcleo a medida que su tamaño disminuía cada vez más rápidamente y estudiamos las casi grotescas distorsiones del espacio y el tiempo en su entorno, producidas por toda esta violencia gravitatoria. La singularidad aparecía como el límite último de la física, el final de todas las leyes conocidas. Aparece inexorablemente, como el resultado inevitable de la formación de una superficie atrapada que puede hacer que la luz se curve sobre sí misma y retorcer el espacio en el tiempo.

Vimos dos actitudes opuestas ante la singularidad. La primera la considera como el borde de la existencia, lo infinito que limita a lo finito, una especie de vacío donde se acaba el mundo natural. El punto de vista alternativo, defendido con elocuencia por John Wheeler, considera que la singularidad es el umbral donde quedan superados el espacio y el tiempo, si bien el mundo físico, en cierto sentido amplio, sobrevive. En qué sentido, es algo que nadie sabe. Sólo una singularidad desnuda puede proporcionar la respuesta.

Muchos de los temas que hemos tratado en este libro parecen más relacionados con la filosofía y la religión que con la clase de ciencia a la que estamos tan acostumbrados en nuestra experiencia

cotidiana. Aquellos que se dedican a estas materias –cosmología, gravedad y relatividad, estructura del espacio-tiempo, etc.– son a menudo acusados de que todo esto no tiene ninguna importancia para el "verdadero fin" de la ciencia, es decir, el servicio del hombre a través de la tecnología.

La historia de la ciencia muestra, a este respecto, una curiosa evolución. En las sociedades más primitivas no existía en absoluto lo que normalmente llamamos ciencia. Pero el desarrollo de la comunicación simbólica (pintura, escritura, escultura, etc.) proporcionó la posibilidad de organizar el conocimiento y la experiencia en beneficio de la comunidad. Si bien el concepto de experimento es relativamente reciente (posterior a Galileo), el hombre primitivo debió aprender por el proceso de prueba y error todos los rudimentos de una sociedad ordenada: cómo fabricar armas y herramientas agrícolas, cómo construir casas y ciudades, cómo regar los cultivos, etc. Lenta pero firmemente, de forma a veces fortuita, las culturas primitivas fueron ganando el control sobre su entorno y dejaron registradas las técnicas para la posteridad. La ciencia, aun en la forma vacilante que tenía, estaba, sin embargo, muy estrechamente ligada con las necesidades tecnológicas de la sociedad.

Más tarde, en lo que se denomina vagamente como la antigua Grecia, vemos a la ciencia –al igual que las matemáticas en proceso de rápido desarrollo– siguiendo caminos paralelos. Seguramente, las necesidades tecnológicas, sin duda de dominio militar, requerían aún del esfuerzo intelectual, pero la mayor parte de la sabiduría realmente importante que nos ha llegado desde los tiempos clásicos proviene no de los campos de batalla o de los talleres, sino de los filósofos y los teólogos. Las técnicas de investigación eran, desde luego, muy diferentes de las actuales. Las discusiones sobre temas tales como la existencia de átomos, las leyes del movimiento o la organización del Cosmos no se dirimían mediante el experimento o la observación cuidadosa, sino apelando a principios teológicos basados en dogmas absolutos.

La tradición de que la "ciencia" era un campo de la teología estuvo tan firmemente establecida en los siglos posteriores que durante la Edad Oscura en Europa, el clero cristiano y el mundo islámico fueron prácticamente los únicos responsables de la transmisión del conocimiento en Occidente. Cuando llegó el Renacimiento en Europa, la Iglesia poseía un dominio tan grande sobre los temas "científicos" que los disidentes se veían a menudo amenazados por la elección entre la muerte o la sumisión a la doctrina. Parece que en mu-

chos aspectos la ciencia estaba única y exclusivamente al servicio de la religión y cuestiones tales como la estructura de la materia, la naturaleza del espacio y el tiempo o el origen y el fin del Universo eran consideradas como legítimos, e incluso importantes, temas de estudio para el bien de la cristiandad.

Los historiadores han venido discutiendo sobre las raíces de las causas que originaron la desintegración de esta opresión teológica, pero está claro que un factor que contribuyó fue el crecimiento del comercio mundial y los descubrimientos en el Nuevo Mundo. A medida que las naciones se iban volviendo más complejas, se fue necesitando cada vez más tecnología para adquirir una ventaja sobre los competidores en materia de comercio, colonización y guerras. Se necesitaban instrumentos de navegación sofisticados y armas móviles modernas, y además el naciente comercio con el Este trajo consigo nuevos problemas de transporte, almacenamiento y distribución. La ciencia y las matemáticas se fueron introduciendo cada vez más en el área de los instrumentos prácticos, desde el telescopio hasta la máquina de hilar.

La revolución industrial que siguió a la liberación de la ciencia del yugo teológico produjo repercusiones en los siglos posteriores que todavía pueden sentirse en la actualidad. Una vez más es la tecnología antes que la filosofía la que requiere la atención continuada del científico. El uso de la ciencia para obtener ventajas o superioridad militar toma en la actualidad el nombre de "ciencia aplicada". La búsqueda del conocimiento, por sí mismo o al servicio de ideales más abstractos, tales como descubrir el objeto de nuestra existencia, ha venido a llamarse "ciencia pura". Naturalmente, la distinción es artificial y con el tiempo diversos temas van pasando del campo de la ciencia pura a la aplicada y a veces al revés.

La importancia de esta distinción entre ciencia pura y aplicada radica no tanto en su significado epistemológico como en la organización práctica del tema. La investigación científica (en su sentido más amplio) es hoy en día una gran industria que ocupa una parte significativa de los recursos económicos y humanos del mundo. La inversión en educación e investigación deja atrás a cualquier otra área de gasto, incluso en estos tiempos de desenfrenada carrera de armamentos. El negocio del saber es muy importante.

¿Cómo deberían administrarse estas grandes inversiones? ¿Quién debe decidir qué temas de investigación deben tener prioridad o qué materias de enseñanza deberían recibir subvenciones en universidades y centros superiores?

En la práctica, son dos las fuerzas mayores que más influyen en la distribución de los recursos disponibles y de la inversión. Por un lado están las demandas de la sociedad, a la cual se le pide que dedique parte de la riqueza común a empresas que a veces no son comprendidas, cuando no vistas con recelo por muchos. Por otro lado, el científico individual tiene sus propios motivos para seguir una determinada línea de investigación. Entre éstos pueden estar la curiosidad innata, aprovechamiento de la oportunidad, ganancias monetarias, reconocimiento social o ético o simplemente habilidad; hacemos aquello de lo cual somos capaces.

La experiencia demuestra que es necesario adoptar un compromiso entre la libertad académica y los beneficios concretos de las inversiones (es decir, las "aplicaciones"). Por ejemplo, debería organizarse un gran esfuerzo de investigación para resolver el problema del control de la fusión nuclear, lo cual contribuiría a una estrategia energética alternativa. Dado que la fusión controlada es un fin deseable (lo cual discuten algunos), la forma evidente de lograrlo sería reunir un gran número de "expertos", establecer un programa de enseñanza agresivo para jóvenes graduados e invertir considerables sumas de dinero en instalaciones y equipos experimentales. Entonces se podría esperar que tras un intervalo de tiempo razonable (¿quince años?) el problema quedaría resuelto y se podrían construir plantas de energía de fusión comerciales. Este escenario se acerca de hecho a la realidad. Tanto los Estados Unidos como la Unión Soviética tienen en la actualidad considerables programas de investigación de la fusión controlada, mientras que el esfuerzo europeo se concentra en el llamado JET (Joint European Torus) situado en Culham, Berkshire (Gran Bretaña).

¿Estimulan los precedentes históricos el uso de estas tácticas "directas" para resolver importantes problemas tecnológicos? Desgraciadamente, el progreso científico debe más a los descubrimientos accidentales en investigaciones aparentemente inútiles (en el sentido de beneficios) que a una inversión orientada a un fin concreto. Si bien esto no es estrictamente cierto para las cosas más prácticas (inventar una bombilla más brillante, un pegamento más adherente, una pintura verde aún más verde, una máquina que contamine menos...), parece que sí lo es para descubrimientos realmente fundamentales.

Unos pocos ejemplos bastarán para justificar lo que decimos. La investigación matemática de Maxwell sobre la relación entre las fuerzas eléctricas y magnéticas debe considerarse como pertene-

ciente al campo de la ciencia pura. Fue iniciada con el único fin de profundizar en los conocimientos, de Maxwell en particular y de la humanidad en general, sobre la naturaleza del electromagnetismo y de los principios matemáticos en los cuales se basa aquél. El resultado de este trabajo trascendental fue el descubrimiento (matemático) de las ondas electromagnéticas, producidas y detectadas algunos años más tarde en el laboratorio de Heinrich Hertz. El hecho de que hoy en día habitemos en una sociedad unida por la comunicación electromagnética de uno u otro tipo no se deriva de ninguna decisión comercial, militar o administrativa de establecer un rimbombante programa de investigación sobre las telecomunicaciones, sino de la terca sospecha de un apacible caballero escocés de que la teoría de la electricidad y el magnetismo que existía estaba ligeramente equivocada.

Otro episodio histórico reciente fue el desarrollo del vuelo. Al finalizar el siglo pasado existía una evidente presión comercial por conseguir máquinas volantes más pesadas que el aire, y se dedicaron muchas investigaciones "directas" a la comprensión del mecanismo de vuelo de los pájaros. Intrépidos aviadores sacudieron sus alas quedando en el olvido, mientras que el descubrimiento realmente significativo tenía lugar en otra parte con el desarrollo del motor de gasolina, que por sí solo podía proporcionar la potencia necesaria para el vuelo.

Nuestra época está repleta de problemas sociales que son atacados de forma "directa". La búsqueda de una curación para el cáncer consume una enormemente desproporcionada cantidad de dinero en comparación con el limitado progreso que se ha realizado. Y en cambio es casi seguro que cualquier curación provendrá no de una investigación directa de la enfermedad, sino a través de un avance en bioquímica fundamental. Y la mayor contribución para solucionar la escasez de alimentos en el mundo no es la más evidente –encontrar la forma de obtener más alimentos–, sino eficaces anticonceptivos.

En una sociedad tan compleja como la nuestra el enfoque "directo" a los problemas es a menudo el peor. Por ejemplo, los proyectos de fusión nuclear controlada se han venido alargando sin resultados nuevos durante una generación. A menudo la solución surge súbitamente de un área totalmente inesperada sin ninguna relación evidente con el tema tratado. Relatos como el del descubrimiento accidental de la radiactividad por Antoine Henri Becquerel (al descubrir una placa fotográfica que se había velado misteriosamente) o la suerte de Alexander Fleming al reconocer el efecto inhibitorio del moho sobre un cultivo de bacterias, lo cual le condujo a la penicilina, refuerzan la imagen del científico emancipado que sigue su propia intuición más que las órdenes de su patrocinador.

Este reconocimiento de que la ciencia pura de hoy puede convertirse en la ciencia aplicada del mañana es el que convence a los gobernantes preocupados por el gasto público de que hay que continuar apoyando la investigación fundamental por su propio bien. Dentro de esta área encajan perfectamente la astronomía, la astrofísica, la cosmología y en gran medida las teorías de la gravedad, del espacio y el tiempo y de la materia subatómica. Hace cien años todos estos temas constituían la preocupación de científicos individuales, o de pequeños grupos que trabajaban en laboratorios que no eran más que pequeños cobertizos, y con presupuestos que sólo representaban una minúscula parte de los recursos de su institución. Hoy en día la mayor parte de los científicos "puros" trabajan en grandes equipos de laboratorio, a menudo integrados en una universidad, y los presupuestos nacionales para cada año llegan a los cientos de millones de dólares. Un nuevo telescopio o un satélite o la próxima generación de aceleradores de partículas ocupa en cada caso muchos millones en presupuestos cada vez menores. Ya no es posible realizar grandes descubrimientos con lacre y alambre en el ático. La ciencia se ha institucionalizado y se ha integrado en el sistema socioeconómico.

A veces las naciones ricas consideran los programas de investigación en ciencia pura como proyectos de prestigio. Los Premios Nobel representan una especie de símbolo de virilidad intelectual de una nación, y se duplica gran parte del esfuerzo de investigación en la carrera por conseguirlos. Algunos consideran que ésta es una competición saludable, pero muchos creen que es un juego de despilfarro.

Hay otra cara en la ciencia pura aparte del prestigio y el éxito inesperado, y es lo que podríamos llamar, en general, el interés humano. Los temas realmente fundamentales –la naturaleza del Universo y el lugar que ocupa la humanidad en él– estarán siempre en la mente de todo el mundo. Quizás la ciencia ya no sea servidora de la religión, pero sigue contribuyendo, de forma difícilmente cuantificable, a las amplias perspectivas filosóficas que subyacen bajo el estruendo de la sociedad tecnológica. En el capítulo 1 examinamos los orígenes históricos de la conexión cósmica y vimos lo cerca del pensamiento humano que han estado la astrología y la astronomía du-

rante muchos siglos. En nuestra época, a pesar de las distracciones que nos proporcionan las cosas materiales, la conexión cósmica persiste. La Tierra, hoy más que nunca una partícula insignificante en la inmensidad del espacio, sólo puede ser vista como una minúscula parte de un gran esquema.

Para mucha gente los descubrimientos de la astronomía moderna seguirán siendo remotos y sin importancia. ¿Qué tienen que ver los pulsars o los quasars con los problemas de la vida familiar y del esfuerzo diario? Y sin embargo la vida consiste en algo más que en pasar simplemente por ella, y la historia de la humanidad está llena de luchas de nuestra especie por establecer su superioridad a través de la tecnología y para extender su conocimiento mediante la investigación fundamental. Nuestros antepasados consideraban que la reflexión sobre el orden cósmico era la empresa más natural del mundo.

¿Y el futuro? Si la ciencia pura no se detiene por falta de apoyo o por el simple coste de funcionamiento de unos laboratorios cada vez más caros, ¿podemos esperar que los próximos cien años sean tan productivos como los pasados?

En este libro me he detenido sobre algunos de los problemas más fundamentales y desafiantes de la ciencia actual. Muchas de las cosas que hemos examinado, en especial la naturaleza de los agujeros negros, de los quasars, las primeras etapas de la Gran explosión y las consecuencias últimas del colapso gravitatorio, sólo se comprenden de forma vaga. Hace veinte años ninguno de estos temas ni siquiera existía. No obstante, parece que se enfrentan a la ciencia con una crisis sin parangón desde comienzos de siglo. Hay dos resultados posibles: o bien estamos al final del camino o bien estamos en el umbral de una nueva revolución en la física.

El progreso científico se ha convertido en algo tan habitual que muchos lo aceptan como si fuera una ley de la naturaleza. Parece casi universalmente aceptado que por muy enigmático que sea un cierto aspecto de la naturaleza, tarde o temprano la ciencia acabará obteniendo la respuesta. En realidad los avances en los dos últimos siglos han sido tan espectaculares que es muy fácil dar por sentado que el ritmo de progresos y descubrimientos continuará creciendo.

A pesar de ello, no hay ningún principio básico que obligue a la naturaleza a poner en nuestras manos la solución cuando nos quedamos detenidos ante un problema. El físico Eugene Wigner ha hablado de la "irrazonable efectividad de las matemáticas en las ciencias naturales". Estamos tan acostumbrados al éxito de los sencillos

modelos matemáticos que es difícil para nosotros darnos cuenta de lo asombrosamente notable que es esto. Las ecuaciones de Einstein pueden condensarse en el increíblemente simple requisito de que el comportamiento gravitatorio de la materia debe ser siempre regulado de tal modo que dos cantidades matemáticas permanezcan siempre constantes. Esta ecuación se puede utilizar para deducir toda la física gravitatoria. Una ecuación igualmente condensada describe la fuerza electromagnética. ¿Por qué la naturaleza nos deja escribir la mayor parte de sus secretos en una sencilla hoja de papel?

No deja de ser sorprendente que el Universo, un lugar tan complejo, esté, sin embargo, regido por sencillos principios matemáticos. A veces esto se expresa diciendo que "Dios es un matemático", mientras que otros argumentan que la matemática ha sido inventada específicamente para describir el mundo que nos rodea, de manera que no es sorprendente que este mismo mundo se ajuste a unas expresiones matemáticas sencillas. (El lector puede pensar, al mirar un libro de electrodinámica o de relatividad, que la palabra "simple" se toma aquí en un sentido muy amplio. No es así. Las matemáticas modernas pueden ser esotéricas o duras conceptualmente, pero son al mismo tiempo sencillas y elegantes.) Sea la simplicidad matemática un asunto divino o humano, el hecho es que esta característica es, más que ninguna otra, la causa principal del progreso de las ciencias físicas.

Debemos enfrentarnos con la posibilidad de que se estén acabando los sistemas matemáticamente simples en el mundo físico. Podría ser que más allá del colapso gravitatorio la física –la pregeometría de Wheeler o lo que pueda haber– permaneciera siempre más allá de nuestra capacidad matemática de descripción, bien porque las matemáticas no sean suficientemente avanzadas o sencillamente porque no existe una descripción matemática de una tal situación. En las ciencias biológicas nos encontramos ante una impresionante variedad de formas y complejos procesos de vida, poquísimos de los cuales han podido ser adecuadamente tratados mediante las matemáticas. La aleatoriedad y la probabilidad desempeñan una parte muy importante en la física subatómica y en la biología, pero las matemáticas todavía no ha conseguido hacer frente a esta última. Parece una tarea sin esperanza el poder conseguir una ecuación que prediga un perro o que contenga términos que puedan identificarse con el sistema digestivo de un animal. Tal vez el colapso gravitatorio sea parecido –un zoo de posibilidades, sin ninguna razón lógica de una sobre la otra, y sin ningún método detallado de predicción–.

Si la singularidad nos lleva a un embrollo semejante, entonces ciertamente representará el fin del camino de la física como ciencia exacta. Por otro lado, cuanto más profundamente exploramos la naturaleza, más simple parece volverse, de manera que tal vez no sea descabellado esperar que, escondida en los recodos de la ruptura del espacio-tiempo –en el borde del infinito– descubramos una era totalmente nueva para la física, más elegante y más fundamental que la que ya tenemos. Así lo espera Wheeler. Escribe: "Algún día se abrirá una puerta y pondrá al descubierto el espléndido mecanismo central del mundo en toda su belleza y sencillez. La paradoja del colapso gravitatorio es lo que mantiene firme la esperanza en la llegada de ese día."

El camino hacia esta nueva física del futuro está más allá del borde del infinito. Sólo podemos imaginar lo que nos dirá. Indudablemente nos mostrará que el espacio y el tiempo son solamente ideas aproximadas; nos revelerá cómo se relacionan y unen el mundo cuántico, el espacio y el tiempo. Nos permitirá llevar nuestro análisis más allá del espacio-tiempo, hasta un dominio que hoy parece estar más allá del Universo físico. La nueva física resolverá la cuestión de a dónde va una estrella en colapso y qué es lo que resulta de una singularidad desnuda. Puede que incluso nos diga de dónde viene el Universo y cómo terminará.

Todo esto lo alcanzaremos si aceptamos el reto de la singularidad.

BIBLIOTECA CIENTÍFICA SALVAT

1. **El Universo desbocado.** *Del big bang a la catástrofe final.* Paul Davies
2. **Gorilas en la niebla.** *Trece años viviendo entre gorilas.* Dian Fossey
3. **Dormir y soñar.** *La mitad nocturna de nuestras vidas.* Dieter E. Zimmer
4. **Superfuerza.** Paul Davies
5. **Las raíces de la vida.** *Genes, células y evolución.* M. Hoagland
6. **Microelectrónica.** *Las computadoras y las nuevas tecnologías.* Stefan M. Gergely
7. **El telar mágico.** *El cerebro humano y la computadora.* Robert Jastrow
8. **De los átomos a los quarks.** James S. Trefil
9. **El gen egoísta.** *Las bases biológicas de nuestra conducta.* Richard Dawkins
10. **¡Qué viene el cometa!** Nigel Calder
11. **Las plantas.** *«Amores y civilizaciones» vegetales.* Jean-Marie Pelt
12. **La frontera del infinito.** *De los agujeros negros a los confines del Universo.* Paul Davies
13. **La verdadera historia de los dinosaurios.** Alan Charig

LA FRONTERA DEL INFINITO

De los agujeros negros a los confines del Universo

PAUL DAVIES

Existen lugares del Universo en los que la gravedad es tan fuerte que arrolla todas las leyes y fundamentos físicos, destruye el espacio y el tiempo y los transforma en singularidades.
¿Qué ocurre cuando la gravedad se apodera del control de la materia y corre hacia el infinito? ¿Qué es una singularidad desnuda? ¿Qué relación hay entre un agujero negro y una singularidad?
La frontera del infinito responde puntual y científicamente a estas preguntas sin recurrir a explicaciones complicadas. Este libro interesará también a las personas a quienes la ciencia real resulta más extraña que la ciencia ficción.
Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres y catedrático de física teórica en la Universidad de Newcastle. Autor de artículos para publicaciones científicas y de libros como: El Universo desbocado; Superfuerza; El Universo accidental; Dios y la nueva física; En busca de las ondas de gravitación; Otros mundos, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.



12

LA FRONTERA DEL INFINITO - Paul Davies

SALVAT

PAUL DAVIES

LA FRONTERA DEL INFINITO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

LA FRONTERA DEL INFINITO

De los agujeros negros a los confines del Universo

PAUL DAVIES

Existen lugares del Universo en los que la gravedad es tan fuerte que arrolla todas las leyes y fundamentos físicos, destruye el espacio y el tiempo y los transforma en singularidades.
¿Qué ocurre cuando la gravedad se apodera del control de la materia y corre hacia el infinito? ¿Qué es una singularidad desnuda? ¿Qué relación hay entre un agujero negro y una singularidad?
La frontera del infinito responde puntual y científicamente a estas preguntas sin recurrir a explicaciones complicadas. Este libro interesará también a las personas a quienes la ciencia real resulta más extraña que la ciencia ficción.
Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres y catedrático de física teórica en la Universidad de Newcastle. Autor de artículos para publicaciones científicas y de libros como: El Universo desbocado; Superfuerza; El Universo accidental; Dios y la nueva física; En busca de las ondas de gravitación; Otros mundos, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.



12

LA FRONTERA DEL INFINITO - Paul Davies

SALVAT

PAUL DAVIES

LA FRONTERA DEL INFINITO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

LA FRONTERA DEL INFINITO
De los agujeros negros a los confines del Universo
PAUL DAVIES

Existen lugares del Universo en los que la gravedad es tan fuerte que arrolla todas las leyes y fundamentos físicos, destruye el espacio y el tiempo y los transforma en singularidades.
¿Qué ocurre cuando la gravedad se apodera del control de la materia y corre hacia el infinito? ¿Qué es una singularidad desnuda? ¿Qué relación hay entre un agujero negro y una singularidad?
La frontera del infinito responde puntual y científicamente a estas preguntas sin recurrir a explicaciones complicadas. Este libro interesará también a las personas a quienes la ciencia real resulta más extraña que la ciencia ficción.
Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres y catedrático de física teórica en la Universidad de Newcastle. Autor de artículos para publicaciones científicas y de libros como: El Universo desbocado; Superfuerza; El Universo accidental; Dios y la nueva física; En busca de las ondas de gravitación; Otros mundos, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.



12

LA FRONTERA DEL INFINITO - Paul Davies

SALVAT

PAUL DAVIES

LA FRONTERA DEL INFINITO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

LA FRONTERA DEL INFINITO
De los agujeros negros a los confines del Universo
PAUL DAVIES

Existen lugares del Universo en los que la gravedad es tan fuerte que arrolla todas las leyes y fundamentos físicos, destruye el espacio y el tiempo y los transforma en singularidades.
¿Qué ocurre cuando la gravedad se apodera del control de la materia y corre hacia el infinito? ¿Qué es una singularidad desnuda? ¿Qué relación hay entre un agujero negro y una singularidad?
La frontera del infinito responde puntual y científicamente a estas preguntas sin recurrir a explicaciones complicadas. Este libro interesará también a las personas a quienes la ciencia real resulta más extraña que la ciencia ficción.
Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres y catedrático de física teórica en la Universidad de Newcastle. Autor de artículos para publicaciones científicas y de libros como: El Universo desbocado; Superfuerza; El Universo accidental; Dios y la nueva física; En busca de las ondas de gravitación; Otros mundos, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.



12

LA FRONTERA DEL INFINITO - Paul Davies

SALVAT

PAUL DAVIES

LA FRONTERA DEL INFINITO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT

LA FRONTERA DEL INFINITO

De los agujeros negros a los confines del Universo

PAUL DAVIES

Existen lugares del Universo en los que la gravedad es tan fuerte que arrolla todas las leyes y fundamentos físicos, destruye el espacio y el tiempo y los transforma en singularidades.
¿Qué ocurre cuando la gravedad se apodera del control de la materia y corre hacia el infinito? ¿Qué es una singularidad desnuda? ¿Qué relación hay entre un agujero negro y una singularidad?
La frontera del infinito responde puntual y científicamente a estas preguntas sin recurrir a explicaciones complicadas. Este libro interesará también a las personas a quienes la ciencia real resulta más extraña que la ciencia ficción.
Paul Davies es profesor de matemáticas aplicadas en el King's College de Londres y catedrático de física teórica en la Universidad de Newcastle. Autor de artículos para publicaciones científicas y de libros como: El Universo desbocado; Superfuerza; El Universo accidental; Dios y la nueva física; En busca de las ondas de gravitación; Otros mundos, todos ellos en la colección Biblioteca Científica Salvat.



12

LA FRONTERA DEL INFINITO - Paul Davies

SALVAT

PAUL DAVIES

LA FRONTERA DEL INFINITO

BIBLIOTECA CIENTIFICA SALVAT